



**Modélisation bottom-up, un outil d'aide à la décision  
long terme pour les mesures politiques en matière  
d'énergie et d'environnement : le modèle TIMES  
appliqué aux industries grandes consommatrices  
d'énergie**

Ahcène Djemaa

► **To cite this version:**

Ahcène Djemaa. Modélisation bottom-up, un outil d'aide à la décision long terme pour les mesures politiques en matière d'énergie et d'environnement : le modèle TIMES appliqué aux industries grandes consommatrices d'énergie. Sciences de l'Homme et Société. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2009. Français. NNT : . pastel-00005303

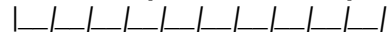
**HAL Id: pastel-00005303**

**<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00005303>**

Submitted on 28 Jul 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Président  
Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur



# Remerciements

## **A Madame le Professeur Nadia Maïzi-Menard**

Directrice du Centre de Mathématiques Appliquée de l'Ecole de Mines de Paris

Directrice de Thèse

Recevez, Madame Maïzi, mes plus sincères remerciements pour m'avoir accueilli dans votre centre. Je tiens également à vous exprimer ma reconnaissance pour votre grande disponibilité, votre soutien et vos précieux conseils qui ont fait progresser ce travail. La confiance que vous m'avez accordée pendant ces années de thèse m'a permis de progresser rapidement. Soyez assurée Madame Maïzi de toute mon estime et de mon profond respect.

## **A Monsieur Bernard Declerck**

Chef de département

Département Eco-Efficacité et procédés industriels

Recevez, Monsieur Declerck, mes plus sincères remerciements pour m'avoir accueilli au sein de votre département. Je tiens également à vous exprimer ma reconnaissance pour votre soutien. Soyez assuré Monsieur Declerck de toute mon estime et de mon profond respect.

## **A Madame Sandrine Hartmann**

Chef de groupe

Département Eco-Efficacité et procédés industriels

Groupe Expertise Clients et Secteurs industriels

Recevez, Madame Hartmann, mes plus sincères remerciements pour m'avoir accueilli au sein de votre groupe. Je tiens également à vous exprimer ma reconnaissance pour votre grande disponibilité et votre soutien. Soyez assurée Madame Hartmann de toute mon estime et de mon profond respect.

## **A Monsieur le Professeur Jean Charles Hourcade**

**Directeur de recherche au CNRS**

**Directeur du CIRED**

Je suis très sensible à l'honneur que vous me faites en acceptant de présider ce jury de thèse. Soyez assuré monsieur Hourcade de mon plus profond respect.

**A Monsieur le Professeur Jacques Percebois**

**Professeur Agrégé en Sciences Economiques**

**Directeur de CREDEN et du LASER**

Je suis très touchée de l'honneur que vous me faites en acceptant de juger ce travail et d'en être le rapporteur. Veuillez accepter mes plus vifs remerciements pour votre présence dans ce jury et soyez assuré Monsieur Percebois de tout mon respect et de ma profonde gratitude.

**A Monsieur le Professeur Evasio Lavagno**

Département de l'énergie, polytechniques du Turin

Mes remerciements les plus respectueux vont également à Monsieur le Professeur Lavagno qui m'a fait l'honneur de prendre connaissance de ce travail et d'en être rapporteur. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

**A Monsieur Gilles Guerassimoff**

Enseignant chercheur

Ecole des Mines de Paris - Centre de Mathématiques Appliquées

Maître de thèse

Je vous adresse toute ma gratitude pour votre soutien sans faille, votre disponibilité, votre sympathie, votre rigueur scientifique, votre enthousiasme et vos précieux conseils qui ont permis la réalisation de ce travail. Les remerciements exprimés ici ne seront jamais à la hauteur de votre implication dans ce travail. Je suis particulièrement honoré de votre présence dans ce jury de thèse.

**A Monsieur Alain Hita**

Ingénieur chercheur

Département Eco-Efficacité et procédés industriels

Groupe Expertise Clients et Secteurs industriels

Je vous adresse toute ma gratitude pour votre aide, votre disponibilité, votre sympathie, votre rigueur scientifique, vos idées ingénieuses, et vos précieux conseils qui ont fait progresser ce travail. Les remerciements exprimés ici ne seront jamais à la hauteur de votre implication dans ce travail. Je suis particulièrement honoré de votre présence dans ce jury de thèse.

### **A Monsieur Pascal Terrien**

Directeur d'ECLEER

Recevez, Monsieur Terrien, mes plus sincères remerciements pour votre soutien. Soyez assuré Monsieur Terrien de toute mon estime et de mon profond respect.

### **A Monsieur Sébastien Ruiz**

Recevez, Monsieur Ruiz, mes plus sincères remerciements pour votre soutien. Soyez assuré Monsieur Ruiz de toute mon estime et de mon profond respect.

### **Au Groupe E27**

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à l'ensemble des agents du groupe E27 (Béatrice, Bertrand, Christian, Cyril, Daniela, Ignace, Marion, Maxime, Pierre-Jean, René, Richard, Vincent et Yann) pour leur sympathie, leur disponibilité et leur soutien. Merci d'avoir fait de ces années une expérience riche et agréable.

Je voudrais exprimer en particulier mes remerciements à Madame Chantal Hauser pour la relecture minutieuse de mon manuscrit.

Merci aussi à Jean-Marc Lauruol pour son soutien et les débats de société que nous avons pu avoir.

Merci à Madame Muriel Loiseau pour son aide et sa patience avec tous les aspects administratifs.

A Gondia et Ingrid bon courage.

### **Au Centre de Mathématiques appliquées (CMA)**

Je tiens aussi à dire un grand merci à l'ensemble des membres de CMA pour leur sympathie et leur bonne humeur.

Merci à Dominique pour son soutien, son aide et sa disponibilité. Merci aussi à Edi pour son soutien et son expérience qui m'a servi de guide. Merci à Marc et Valérie. Merci à Hatem, Damiana, Joris, Johan et Sandrine.

A Jan, Lionel, Christian, Mathilde et Salma bon courage.

### **Au département EPI**

Je vous adresse ma sincère reconnaissance pour vos conseils, votre soutien et votre disponibilité. Merci à Fayez Kassabji, François Cattier, Romain Richard et Marie-Marguerite Quéméré. Soyez assurés de mon plus profond respect.

A Marie-Lou bon courage.

## **A EDF**

Je vous exprime ma reconnaissance pour votre soutien. Merci à Frédéric Verdol, Emmanuelle Pons, Jérôme Wirth, Jaya Bezavada, Michelle Dhaussy, Florent Le Strat et Christophe Marchand. Soyez assurés de mon profond respect.

## **A l'Ecole des Mines de Paris**

Je vous exprime ma reconnaissance de m'avoir accueilli.

## **A tous ceux qui ont contribué à ce travail**

Enfin je tiens à exprimer mes remerciements à tous ceux qui ont contribué par leur soutien à ce travail.

## **A mes amis**

Sofiane, Karim, Damien, Frédéric, Lionel, Suzanne, Emmanuelle, Adriana, Izabella, Anais, Lyna, Nadjim, Ghani, Salah, Farouk et Hakim.

Je voudrais adresser un remerciement particulier à Erofil pour son amour, son soutien et sa patience.

Merci à tous ceux, dans mon pays et ici, que je ne peux citer nommément mais dont l'amitié et le soutien m'ont été chers.

A mes parents,  
A Kamal,  
A Loucif,  
A Souhila,  
A Smail,  
A Yacine,  
A Emmanuelle,  
Au petit ou à la petite qui arrivera bientôt,  
A Amar,  
A Lila, Frédéric et Aksel,  
A Madjid,

---

## Table des Matières

---

---

### INTRODUCTION GENERALE

---

<b>1. CONTEXTE .....</b>	<b>9</b>
<b>2. LES POLITIQUES ENGAGÉES .....</b>	<b>9</b>
<b>3. LE RECOURS À LA MODÉLISATION PROSPECTIVE .....</b>	<b>10</b>
<b>4. INTÉRÊT POUR EDF DE L'ÉTUDE .....</b>	<b>11</b>
<b>5. ORGANISATION DU DOCUMENT.....</b>	<b>12</b>

---

### CHAPITRE I

#### Prospective Energétique et Modélisation dans l'Industrie

---

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>17</b>
<b>2. LE CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE ET ENVIRONNEMENTAL GLOBAL .....</b>	<b>18</b>
2.1. L'ÉNERGIE ET L'ENVIRONNEMENT : DE QUOI PARLE-T-ON ? .....	18
2.1.1. <i>L'Europe dans un monde énergétique en forte croissance .....</i>	<i>18</i>
2.1.2. <i>Le réchauffement climatique : un problème urgent.....</i>	<i>21</i>
2.2. LA POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE EUROPÉENNE.....	22
2.2.1. <i>Limiter les émissions de CO<sub>2</sub> est un défi incontournable.....</i>	<i>22</i>
2.2.2. <i>Faire face à la dépendance énergétique est une nécessité grandissante .....</i>	<i>28</i>
2.2.3. <i>La mondialisation et la compétitivité à l'international : quel avenir pour la croissance économique? .....</i>	<i>32</i>
<b>3. L'INDUSTRIE ET LE CADRE ÉNERGÉTIQUE .....</b>	<b>35</b>
3.1. L'INDUSTRIE EUROPÉENNE : STRUCTURE ET ÉVOLUTION.....	35
3.1.1. <i>Les secteurs de l'économie les plus consommateurs d'énergie .....</i>	<i>35</i>
3.1.2. <i>Une consommation d'énergie en croissance continue .....</i>	<i>35</i>
3.1.3. <i>L'intensité énergétique comme mesure d'économie d'énergie .....</i>	<i>37</i>
3.2. L'INDUSTRIE : FRONTIÈRE ET PÉRIMÈTRE .....	38
3.2.1. <i>IGCE et l'industrie diffuse : définition et frontière .....</i>	<i>38</i>
3.2.2. <i>IGCE : périmètre et cadre d'étude .....</i>	<i>42</i>
3.3. LES PROBLÉMATIQUES ÉNERGÉTIQUES ET ENVIRONNEMENTALES AU CŒUR DES PRÉOCCUPATIONS DE L'INDUSTRIE .....	43
3.3.1. <i>L'énergie dans l'industrie .....</i>	<i>43</i>
3.3.2. <i>La hausse des prix de l'énergie et l'industrie.....</i>	<i>46</i>
3.3.3. <i>La protection de l'environnement dans l'industrie .....</i>	<i>49</i>
3.3.4. <i>Politique énergétique et environnementale comme principal frein à la compétitivité industrielle .....</i>	<i>51</i>
3.3.5. <i>Le cadre énergétique et environnemental et l'intérêt de la modélisation prospective</i>	<i>52</i>
<b>4. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>53</b>



---

## CHAPITRE II

### Les modèles de prospective énergétique pour l'industrie

---

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>63</b>
<b>2. LA FAMILLE DES MODÈLES .....</b>	<b>63</b>
2.1. LES MODÈLES DE TYPE « TOP-DOWN » .....	64
2.2. LES MODÈLES DE TYPE « BOTTOM-UP » .....	65
2.2.1. <i>MARKAL</i> .....	66
2.2.2. <i>TIMES</i> .....	66
<b>3. LE CHOIX D'UN MODÈLE ADAPTÉ À LA MODÉLISATION PROSPECTIVE DE L'INDUSTRIE. ....</b>	<b>68</b>
<b>4. LE MODÈLE TIMES POUR L'INDUSTRIE .....</b>	<b>69</b>
4.1. SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE DE RÉFÉRENCE POUR L'INDUSTRIE (SERI) .....	70
4.1.1. <i>Les produits</i> .....	71
4.1.2. <i>Les procédés (technologies)</i> .....	71
4.1.3. <i>Les paramètres associés</i> .....	72
4.2. UNE BASE TECHNOLOGIQUE RICHE .....	73
4.3. LES ENTRÉES DU MODÈLE .....	73
4.4. LA STRUCTURE MATHÉMATIQUE DU MODÈLE TIMES INDUSTRIE .....	74
4.4.1. <i>Les variables de décision</i> .....	75
4.4.2. <i>Fonction objectif</i> .....	76
4.4.3. <i>Contraintes</i> .....	77
<b>5. CONCLUSION .....</b>	<b>79</b>
<b>6. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>80</b>

---

## CHAPITRE III

### Choix Adoptés pour la modelisation de l'industrie

---

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>87</b>
<b>2. STRUCTURE D'UN MODÈLE TIMES ADAPTÉ À L'INDUSTRIE .....</b>	<b>87</b>
2.1. UNE DIVERSITÉ DANS LES TYPES ET LES MODES DE CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES. ...	88
2.1.1. <i>Des consommations énergétique directes et indirectes dans l'industrie</i> .....	88
2.1.2. <i>Polyvalence de la chaleur produite</i> .....	89
2.2. L'ARCHITECTURE DU MODÈLE INDUSTRIE : UNE REPRÉSENTATION COMMUNE .....	90
2.3. LES IGCE : UNE MODÉLISATION PAR PROCÉDÉ .....	91

<b>3. LES DONNÉES : UN PILIER POUR L'ÉTABLISSEMENT D'UN MODÈLE...</b>	<b>93</b>
3.1. DIVERSITÉ DES SOURCES DE DONNÉES.....	93
3.2. LA CONSTRUCTION DU SYSTÈME DE RÉFÉRENCE : CHOIX D'UN NIVEAU D'AGRÉGATION .	94
3.3. PALLIER À L'ABSENCE DE DONNÉES : LE REGROUPEMENT GÉOGRAPHIQUE .....	100
3.4. MODÈLE EUROPE : TRANSPOSITION DU MODÈLE FRANCE.....	102
<b>4. LES CHOIX ENGAGÉES DANS LA REPRÉSENTATION DU MODÈLE TIMES INDUSTRIE.....</b>	<b>104</b>
4.1. LE CHOIX DU PAS DE TEMPS : L'ANNÉE S'IMPOSE.....	104
4.1.1. <i>Découplage entre les données du modèle et l'horizon de temps : une possibilité d'ajustement.....</i>	<i>104</i>
4.1.2. <i>L'année de base : un calage nécessaire .....</i>	<i>104</i>
4.2. CAPACITÉ RÉSIDUELLE : DÉTERMINANTE POUR LE RYTHME DE REMPLACEMENT DES ÉQUIPEMENTS .....	105
4.2.1. <i>Équipements de production à l'année de référence .....</i>	<i>105</i>
4.2.2. <i>La durée de vie des équipements n'est pas toujours fixe .....</i>	<i>108</i>
4.2.3. <i>Durée de vie de la capacité résiduelle : une approche par zone géographique ...</i>	<i>109</i>
4.2.4. <i>Comment gérer « le revamping », le remplacement partiel des équipements.....</i>	<i>110</i>
4.3. BASE DES NOUVELLES TECHNOLOGIES : UN ÉLÉMENT DÉTERMINANT .....	113
4.4. APPROVISIONNEMENT EN ÉNERGIE ET MATIÈRES PREMIÈRES : INFLUENCE SUR LES CHOIX D'INVESTISSEMENT.....	119
4.5. LES ÉMISSIONS DE CO <sub>2</sub> DANS L'INDUSTRIE : UNE REPRÉSENTATION PLUS FINE .....	121
4.6. PARTICULARITÉS POUR LA FRANCE : LA MODÉLISATION DES CHAUDIÈRES, UNE SEGMENTATION PAR TYPE DE CHAUDIÈRE .....	123
4.6.1. <i>Durée de vie et disponibilité des chaudières : une segmentation par type de chaudière.....</i>	<i>125</i>
4.6.2. <i>Pertes de chaufferie et pertes de distribution, un élément à prendre en compte...</i>	<i>125</i>
<b>5. QUELQUES SPÉCIFICITÉS DANS NOTRE REPRÉSENTATION DU MODÈLE TIMES INDUSTRIE .....</b>	<b>126</b>
5.1. L'INDUSTRIE VALORISE SES COPRODUITS .....	126
5.1.1. <i>La valorisation interne des coproduits : comment assurer la consistance de TIMES</i>	<i>126</i>
5.1.2. <i>La valorisation inter-sectoriel dans le modèle industrie .....</i>	<i>128</i>
<b>6. CONCLUSION.....</b>	<b>129</b>
<b>7. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>130</b>

---

## CHAPITRE IV

### Hypothèses et Analyse des resultats

---

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>137</b>
<b>2. CALIBRAGE ET VALIDATION DU MODÈLE.....</b>	<b>137</b>
2.1. CALIBRAGE DU MODÈLE POUR L'ANNÉE DE RÉFÉRENCE .....	138
2.1.1. <i>Les consommations énergétiques .....</i>	<i>138</i>
2.1.2. <i>Les émissions de CO<sub>2</sub> .....</i>	<i>139</i>
2.2. VALIDATION DU MODÈLE PAR D'AUTRES SOURCES DE DONNÉES .....	140

<b>3.</b>	<b>LA DÉMARCHE PROSPECTIVE .....</b>	<b>141</b>
<b>4.</b>	<b>LES HYPOTHÈSES COMMUNES AUX SCÉNARIOS D'ANALYSE.....</b>	<b>142</b>
4.1.	CONSTRUCTION DES PROJECTIONS DE LA DEMANDE INDUSTRIELLE.....	142
4.1.1.	<i>Cas de l'Europe.....</i>	<i>142</i>
4.1.2.	<i>Cas de la France.....</i>	<i>144</i>
4.2.	LE PRIX DES MATIÈRES PREMIÈRES .....	146
4.3.	LE TAUX D'ACTUALISATION.....	147
4.4.	HYPOTHÈSES D'ORDRE GÉNÉRAL .....	148
<b>5.</b>	<b>SCENARIOS DE PRIX DES ÉNERGIES : HYPOTHÈSES RETENUES.....</b>	<b>152</b>
<b>6.</b>	<b>DESCRIPTION DES SCENARIOS POUR L'ANALYSE.....</b>	<b>153</b>
6.1.	LE SCÉNARIO TENDANCIEL (SCTEND).....	153
6.2.	LE SCÉNARIO ENVIRONNEMENTAL POST KYOTO (SCATAX) .....	154
6.3.	LE SCÉNARIO FACTEUR 4 (SCBND, SCBNDDT).....	155
<b>7.</b>	<b>PRINCIPAUX RÉSULTATS D'ENSEMBLE .....</b>	<b>157</b>
7.1.	SCENARIO AVEC TAXE CARBONE (SCATAX) : DES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES ORIENTÉES VERS LE GAZ NATUREL .....	158
7.1.1.	<i>Profil d'évolution des consommations énergétiques.....</i>	<i>158</i>
7.1.2.	<i>La structure des consommations énergétiques des IGCE est tirée globalement par la sidérurgie.....</i>	<i>159</i>
7.1.3.	<i>Les IGCE ont réalisé des efforts d'économie d'énergie.....</i>	<i>160</i>
7.1.4.	<i>Coût marginal des nouvelles technologies un élément déterminant pour l'aide à la décision163</i>	
7.1.5.	<i>La croissance de la demande finale reflète les volumes des consommations énergétiques.....</i>	<i>167</i>
7.1.6.	<i>Effet de variation de la taxe de CO<sub>2</sub> sur les consommations énergétiques des IGCE168</i>	
7.1.7.	<i>Emissions de CO<sub>2</sub> des IGCE scenario avec taxe (SCATax).....</i>	<i>169</i>
7.2.	SCENARIO FACTEUR 4 (SCBNDDT) : ENTRE ÉLECTRICITÉ ET STOCKAGE DE CO <sub>2</sub> .....	170
7.2.1.	<i>Profil d'évolution des consommations énergétiques.....</i>	<i>170</i>
7.2.2.	<i>Les chemins technologiques pour la réalisation du facteur 4.....</i>	<i>171</i>
7.2.3.	<i>La réalisation du facteur 4 sans la séquestration et le stockage de CO<sub>2</sub>.....</i>	<i>172</i>
7.2.4.	<i>Emissions de CO<sub>2</sub> des IGCE.....</i>	<i>175</i>
7.3.	LE COÛT DE LA CONTRAINTE ENVIRONNEMENTALE EST DIFFÉRENCIÉ PAR PAYS EN EUROPE177	
7.4.	TAUX D'ACTUALISATION DU CAPITAL UNE MOYENNE PONDÉRÉE DES RETOURS SUR INVESTISSEMENT .....	178
<b>8.</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>179</b>
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>180</b>

## CONCLUSION GENERALE

<b>1.</b>	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>187</b>
1.1.	RAPPEL DE LA PROBLÉMATIQUE .....	187
1.2.	LES SPÉCIFICITÉS DE NOTRE DÉMARCHE .....	187
1.3.	STRUCTURE DU MODÈLE TIMES-INDUSTRIE .....	188
1.4.	LES APPORTS ESSENTIELS DE NOTRE APPROCHE .....	188
1.5.	PRINCIPAUX RÉSULTATS D'ENSEMBLE .....	189
1.6.	LIMITES DU MODÈLE CONSTRUIT .....	190
<b>2.</b>	<b>PERSPECTIVES.....</b>	<b>190</b>

## BIBLIOGRAPHIE GENERALE

**BIBLIOGRAPHIE COMPLÈTE.....193**

# ANNEXES

L'INDUSTRIE DU PAPIER.....	42;
LA SIDÉRURGIE.....	475
L'INDUSTRIE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION.....	535
L'INDUSTRIE DU VERRE.....	689



---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

<b>1. CONTEXTE .....</b>	<b>9</b>
<b>2. LES POLITIQUES ENGAGÉES .....</b>	<b>9</b>
<b>3. LE RECOURS À LA MODÉLISATION PROSPECTIVE .....</b>	<b>10</b>
<b>4. INTÉRÊT POUR EDF DE L'ÉTUDE .....</b>	<b>11</b>
<b>5. ORGANISATION DU DOCUMENT.....</b>	<b>12</b>

## Contexte

*Garantir un approvisionnement propre et durable en énergie dans une vision de long terme devient une nécessité grandissante qui dépend étroitement des décisions prises aujourd'hui.*

Les experts en climat s'accordent aujourd'hui pour dire que les émissions de gaz à effet de serre (GES), liées à l'ensemble des activités humaines, notamment le recours croissant aux énergies fossiles, représentent un risque croissant et grave pour l'environnement et la société. Une augmentation moyenne de la température mondiale de plus de 2°C aurait des conséquences dramatiques sur l'équilibre planétaire ; des changements de températures entraînant la multiplication des catastrophes naturelles avec des amplitudes de plus en plus fortes, les productions agricoles en danger, des précipitations à forte variabilité, l'élévation du niveau des mers liée à la fonte des calottes glaciaires...etc.

La répartition inégale des réserves de gaz et de pétrole à travers le monde combinée à la rareté de ces ressources dans les années à venir constitue une véritable menace pour le monde et en particulier pour l'Union Européenne (UE). Les principales réserves se situent dans des régions instables sur le plan économique et politique (Moyen Orient, Russie). Au rythme actuel de consommation, ces réserves ont une disponibilité d'exploitation de près de 40 ans. Les champs du gaz et de pétrole de la mer du nord sont incapables de satisfaire les consommations énergétiques élevées de l'Europe, rendant celle-ci dépendante des pays non européens pour assurer ses besoins énergétiques (45% des importations en pétrole proviennent du Moyen Orient et 40% du gaz naturel de la Russie). Le livre vert<sup>1</sup> de la commission du 29 novembre 2000, trace un constat alarmant sur la situation énergétique européenne. Si rien n'est entrepris, la dépendance énergétique de l'Europe passera de 50% en 2000 à 70% en 2020 ou 2030.

**Face à ces deux défis indissociables et majeurs, l'Europe doit prendre des mesures drastiques et efficaces en matière d'environnement et d'énergie. L'ensemble des actions qui devrait être engagées plaide pour la mise en place d'instruments efficaces sur l'ensemble des secteurs économiques pour la réduction des consommations énergétiques et la promotion des énergies propres.**

## Les politiques engagées

### A l'international

Pour limiter le réchauffement de la planète, plusieurs actions ont été engagées par la communauté internationale :

- En 1992, lors du sommet de la terre à Rio de Janeiro, une Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) a vu le jour.
- En 1997, à Kyoto, les pays membres de CCNUCC adoptent le protocole de Kyoto. Ce dernier fixe des valeurs limites juridiquement contraignantes pour les émissions de gaz à effet de serre des pays industrialisés.

---

<sup>1</sup> Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnement énergétique



### En Europe

Afin d'honorer les engagements pris dans le cadre du protocole de Kyoto, l'UE a par ailleurs mis en place son propre système d'échange de quotas d'émissions voté au Parlement européen en 2003.

De plus, l'UE s'engage d'ici 2020 à :

- réduire ses émissions interne de 20% au moins (30% dans le cadre d'un accord international),
- réduire les consommations énergétiques de 20%,
- porter la part des énergies renouvelable à 20%.

**Dans ce cadre et pour tracer les effets à long terme de mesures politiques en matière d'énergie et d'environnement, il est incontournable de s'appuyer sur des modèles de prospectives énergétiques.**

## **Le recours à la modélisation prospective**

Les modèles de prospective énergétique constituent une alliée précieuse dans l'aide à la décision. Dans une vision de long terme et en intégrant l'ensemble des facteurs économiques et politiques, ils permettent de tracer une image cohérente des systèmes énergétiques. D'innombrables modèles de prospective énergétique peuvent être utilisés. Chaque modèle est caractérisé par la problématique qui est à traiter

La modélisation prospective n'a pas pour vocation de fournir des résultats sûrs du futur. Ce n'est en aucun cas de la prévision. En effet, elle ne nous permet que d'anticiper un cadre d'évolution probable à partir de scénarii plausibles.

En tenant compte du poids de l'industrie dans les consommations énergétiques et par déduction dans les émissions de gaz à effet de serre, ce travail de thèse développe un cadre méthodologique cohérent pour l'estimation de l'évolution des consommations énergétiques des industries grandes consommatrices d'énergie (IGCE) à l'horizon 2050. le modèle TIMES-Industrie est modèle d'optimisation basé sur la programmation linéaire, il capture par l'analyse des évolutions historiques et des situations actuelles, les clés de répartition futures, en mettant l'accent sur les objectifs à atteindre et les moyens d'y parvenir. L'approche élaborée peut enrichir la discussion des conséquences de mesures énergétiques et environnementales.

Dans ce cadre, l'accent a été mis sur l'évaluation des conséquences des décisions sur la sélection des technologies efficaces et sur les trajectoires d'investissements industriels probables. Ce qui se ramène, par effet des coûts, à un changement structurel dans la diversification des technologies se traduisant par l'apparition ou la disparition de certaines d'entre elles.

Afin de concevoir une description appropriée, les IGCE sont appréhendées en termes physiques, sur la base de leur production et des consommations unitaires par tonne (consommation spécifique). Chaque industrie est spécifiée par un ensemble d'ateliers qui reprennent à l'identique le processus de fabrication, de la matière première au produit final. La formalisation générale de l'industrie est schématisée de manière à permettre de quantifier la consommation énergétique finale pour chaque atelier de production et pour chaque période

de l'horizon de temps considéré.

La préparation d'un ensemble consistant de données s'est avérée difficile et épineuse. En effet, il existe peu de données statistiques de l'industrie en Europe. Seule la collaboration de divers organismes (institutions, industriels,...) a permis l'élaboration d'un ensemble de données complet et cohérent.

Le travail se conclut par des recommandations concrètes et des suggestions pour le développement et l'amélioration du modèle pour l'analyse de questions futures en matière de politique énergétique.

**L'engagement d'EDF dans le développement durable est représentatif des valeurs et des principes auxquels le groupe est attaché et qui guide son action au service de ses clients.**

## Intérêt pour EDF de l'étude

### *Pour EDF les IGCE sont bien plus que de simples clients*

Les industries grandes consommatrices d'énergies (IGCE) représentent une partie importante de la consommation d'électricité en Europe. Pour EDF, ces entreprises sont souvent bien plus que de simples clients. En effet, leurs politiques industrielles ont des répercussions évidentes sur le chiffre d'affaire d'EDF et conditionnent ses choix d'investissement.

Pour EDF, en tant que producteur d'électricité, il est important de comprendre et d'anticiper les volumes d'énergies consommés. Cela permet de prévoir les futurs besoins électriques et d'envisager les investissements associés. Les usines du secteur des IGCE représentent des foyers localisés de forte consommation. La perte ou la croissance de ces unités sont des éléments structurants dans le paysage énergétique.

Pour EDF, en tant que commercialisateur d'énergies, il est important d'avoir une vision la plus objective possible de la pérennité des sites de production des IGCE. Il est nécessaire de comprendre l'influence exacte du coût de l'énergie, mais aussi de la contrainte environnementale (CO<sub>2</sub>), dans la compétitivité de l'industrie.

La plupart des entreprises du secteur IGCE sont également des acteurs importants dans le cadre du marché mis en place sur les permis d'émission de CO<sub>2</sub>. Chaque secteur industriel contraint recherche des marges de manœuvres dans l'exploitation de ses unités de production. L'adoption de nouvelles technologies, moins énergivores et moins émettrices de CO<sub>2</sub> peut être une solution privilégiée. En fonction des possibilités techniques, des secteurs seront potentiellement acheteurs ou revendeurs de quotas CO<sub>2</sub>. Dans un marché global, dont EDF énergétique fait partie, l'analyse de ces options est un atout.

Enfin EDF s'est donné pour ambition de contribuer à imaginer, développer, produire ou commercialiser des solutions énergétiques qui permettront à tous de réduire leurs émissions de CO<sub>2</sub>. Dans l'industrie, cela passe préalablement par l'analyse des procédés consommateurs d'énergie, l'analyse des systèmes énergétiques et la détection des gisements possibles d'économie d'énergie. La modélisation de type bottom-up des secteurs industriels gros consommateurs d'énergie est une approche privilégiée pour détecter, quantifier et qualifier les gisements d'efficacité énergétique dans l'industrie et identifier ensuite les meilleures solutions.

## Organisation du document

Pour une analyse plus aboutie, la démarche prospective adoptée de type MARKAL accorde une description détaillée de l'ensemble des secteurs IGCE. Elle est orientée essentiellement vers les 29 pays européens avec une place centrale pour la France.

Notre approche a été de tirer le meilleur profit des travaux existants, mais aussi de s'adapter aux données disponibles et de répondre au plus près aux attentes d'EDF dans le cadre de leurs objectifs énergétiques et environnementaux à moyen et à long terme.

- **Le chapitre I** trace le cadre énergétique et environnemental global et esquisse les actions européennes engagées pour limiter à la fois les problèmes de réchauffement climatique et la dépendance accrue aux énergies fossiles. Après la définition des IGCE et la délimitation de leur périmètre, ce chapitre développe en outre, le poids de l'industrie dans le bilan énergétique. Le panorama qui a été dressé, pose les premiers jalons quant à une réflexion sur le rôle des industries grandes consommatrices d'énergie pour adhérer à la problématique énergétique et environnementale de l'Union Européenne.
- **Le chapitre II** met en exergue l'intérêt de la prospective énergétique pour simuler à long terme les effets des mesures politiques en matière d'énergie et d'environnement. Il décrit les modèles existants et les critères de choix d'un modèle adapté à l'industrie.
- **Le chapitre III** décrit le modèle réalisé avec une description complète des choix engagés pour une représentation adaptée à l'industrie.
- **Le chapitre IV** aborde les hypothèses de modélisation retenues et analyse les résultats obtenus sur quelques scénarios pratiques.
- Enfin nous concluons sur les apports du modèle réalisé et sur quelques perspectives de recherche et d'amélioration futures.

---

## **CHAPITRE I**

### ***PROSPECTIVE ENERGETIQUE ET MODELISATION DANS L'INDUSTRIE***

---

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>17</b>
<b>2. LE CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE ET ENVIRONNEMENTAL GLOBAL .....</b>	<b>18</b>
2.1. L'ÉNERGIE ET L'ENVIRONNEMENT : DE QUOI PARLE-T-ON ? .....	18
2.1.1. <i>L'Europe dans un monde énergétique en forte croissance</i> .....	18
2.1.1.1. Un Monde énergétique hétérogène .....	18
2.1.1.2. L'Europe manque d'énergie .....	20
2.1.2. <i>Le réchauffement climatique : un problème urgent</i> .....	21
2.2. LA POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE EUROPÉENNE .....	22
2.2.1. <i>Limiter les émissions de CO<sub>2</sub> est un défi incontournable</i> .....	22
2.2.1.1. Le protocole de Kyoto comme engagement mondial .....	22
2.2.1.2. La directive européenne dans la nécessité de réduire ses émissions de gaz à effet de serre 24	
2.2.2. <i>Faire face à la dépendance énergétique est une nécessité grandissante</i> .....	28
2.2.2.1. Prise de conscience de la dépendance énergétique .....	28
2.2.2.2. Les voies d'action .....	30
2.2.3. <i>La mondialisation et la compétitivité à l'international : quel avenir pour la croissance économique?</i> .....	32
2.2.3.1. Cadre général de la croissance économique .....	32
2.2.3.2. Compétitivité internationale et délocalisation .....	33
<b>3. L'INDUSTRIE ET LE CADRE ÉNERGÉTIQUE .....</b>	<b>35</b>
3.1. L'INDUSTRIE EUROPÉENNE : STRUCTURE ET ÉVOLUTION .....	35
3.1.1. <i>Les secteurs de l'économie les plus consommateurs d'énergie</i> .....	35
3.1.2. <i>Une consommation d'énergie en croissance continue</i> .....	35
3.1.3. <i>L'intensité énergétique comme mesure d'économie d'énergie</i> .....	37
3.2. L'INDUSTRIE : FRONTIÈRE ET PÉRIMÈTRE .....	38
3.2.1. <i>IGCE et l'industrie diffuse : définition et frontière</i> .....	38
3.2.2. <i>IGCE : périmètre et cadre d'étude</i> .....	42
3.3. LES PROBLÉMATIQUES ÉNERGÉTIQUES ET ENVIRONNEMENTALES AU CŒUR DES PRÉOCCUPATIONS DE L'INDUSTRIE .....	43
3.3.1. <i>L'énergie dans l'industrie</i> .....	43
3.3.2. <i>La hausse des prix de l'énergie et l'industrie</i> .....	46
3.3.3. <i>La protection de l'environnement dans l'industrie</i> .....	49
3.3.4. <i>Politique énergétique et environnementale comme principal frein à la compétitivité industrielle</i> .....	51
3.3.5. <i>Le cadre énergétique et environnemental et l'intérêt de la modélisation prospective</i> 52	
<b>4. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>53</b>

### ➤ **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1: Secteurs d'activités concernés par le SCEQE .....	25
Tableau 2: Estimation du potentiel total d'économies d'énergie dans les secteurs d'utilisation finale .....	31
Tableau 3: Consommation d'énergie finale par secteur en France (Corrigée du climat) .....	36
Tableau 4: Répartition de l'industrie manufacturière en NACE 3 .....	40
Tableau 5 : Consommation totale d'énergie en ktep Selon le secteur (NCE) en 2006.....	46
Tableau 6: Impacts de la hausse du prix de pétrole, du gaz naturel et du charbon (en point) .	49
Tableau 7: Bilan 2006 des émissions de CO <sub>2</sub> des installations couvertes par la directive européenne.....	49
Tableau 8: Emissions en 2006 par secteur d'activité en France .....	50

### ➤ **LISTE DES FIGURES**

Figure 1 : Consommation mondiale d'énergie par source en 2005.....	18
Figure 2 : Répartition géographique de la consommation d'énergie en 2005 .....	19
Figure 3 : Consommation de pétrole par pays en Europe (10 <sup>3</sup> baril/jour) en 2005.....	20
Figure 4 : Consommation de gaz naturel en milliard de m <sup>3</sup> en 2005. ....	21
Figure 5 : Répartition des émissions de CO <sub>2</sub> par pays de l'annexe I .....	23
Figure 6 : Répartition des efforts de réduction des émissions de CO <sub>2</sub> dans le cadre du protocole de Kyoto par pays, UE-27 .....	24
Figure 7 : Répartition PNAQ 2008-2012 .....	26
Figure 8 : Projection des émissions de l'UE-15 comparées aux objectifs de Kyoto 2008-2012 .....	28
Figure 9 : Répartition de la part des énergies renouvelables, l'UE-27 en 2004.....	31
Figure 10 : Une approche de la définition de la délocalisation.....	34
Figure 11: Répartition des consommations d'énergie finale en Europe 2006 par grand secteur économique.....	35
Figure 12 : Evolution de la consommation finale énergétique européenne par grand secteur économique, sur la période 1973-2006 en Mtep .....	36
Figure 13: Intensité énergétique consommation de combustibles (hors biomasse), indice 100 1980 .....	37
Figure 14: Intensité énergétique consommation d'électricité, indice 100 1980 .....	38
Figure 15 : Ratio coûts énergétiques sur la valeur de production pour les différents secteurs de l'industrie manufacturière.....	39
Figure 16 : Ratio coûts énergétiques sur la valeur ajoutée pour les différents secteurs de l'industrie manufacturière.....	41
Figure 17 : Répartition des IGCE dans le cadre du modèle industriel.....	42
Figure 18 : Schéma de simulation de l'industrie.....	43

Figure 19 : Répartition des consommations de l'énergie par secteur dans l'industrie manufacturière en Mtep.....	44
Figure 20 : Evolution du PIB de la valeur ajoutée industrielle en M\$95.....	44
Figure 21 : Répartition des consommations énergétiques par combustible dans l'industrie manufacturière en Mtep.....	45
Figure 22 : Evolution du cours de Brent depuis 1998 (cours mensuel moyen) .....	47
Figure 23: Evolution des prix de gros du gaz et de l'électricité sur le marché "spot" .....	47
Figure 24 : Evolution des prix de gros de l'énergie sur le marché spot (indice base 100 en 1996).....	48
Figure 25 : Répartition des allocations de CO <sub>2</sub> PNAQ 2008-2012 en France .....	50

# 1. Introduction

**La lutte contre le changement climatique et l'accès à une énergie sûre, compétitive et durable font partie des principaux défis mondiaux du 21<sup>ème</sup> siècle.**

L'énergie joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de l'Europe. Mais l'ère d'une énergie accessible, durable et bon marché est révolue. A cet effet, l'Europe doit d'ores et déjà faire face au nouveau paysage énergétique, marqué par deux défis majeurs :

**Le changement climatique.** Les émissions de gaz à effet de serre, liées en partie à l'ensemble des activités humaines représentent un risque croissant et grave pour l'environnement et la société. Une augmentation moyenne de la température mondiale de plus de 2°C aurait des conséquences dramatiques sur l'équilibre planétaire.

**La dépendance croissante à l'égard des importations et de la hausse des prix de l'énergie :**

L'Europe est vulnérable à la question énergétique<sup>1</sup> : l'Union Européenne (UE) est très dépendante de ses approvisionnements externes<sup>2</sup>. Les réserves de gaz et de pétrole de la mer du nord sont incapables de satisfaire les consommations énergétiques élevées et en forte croissance de l'Europe. La répartition inégale de ces réserves qui se situent majoritairement dans des régions instables sur le plan économique et politique (Moyen Orient, Russie), constitue une menace potentielle pour la sécurité d'approvisionnement de l'UE.

Les prix de l'énergie en croissance continue : La hausse des prix de l'énergie constitue en outre une autre menace pour la croissance économique européenne. L'offre en énergies fossiles qui peine à suivre la demande mondiale croissante entraîne des tensions sur les prix de marché, par conséquent sur la hausse des coûts de production d'autres produits.

Il revient donc à l'Union Européenne de définir une politique énergétique durable, commune, efficace, qui vise le long terme et implique l'ensemble des secteurs économiques, en particulier l'industrie. Les enjeux économiques et écologiques majeurs de cette politique sont orientés essentiellement sur la réduction des consommations énergétiques, les ruptures technologiques et l'usage croissant des énergies renouvelables.

Ce chapitre nous permet de:

- **développer les actions menées par l'UE pour faire face aux conséquences du changement climatique et à la dépendance accrue à l'énergie.**
- **faire un constat sur la situation énergétique de l'industrie, en particulier les industries grandes consommatrices d'énergie (IGCE).**

---

<sup>1</sup> Pour plus de détails : [Percebois, 2007a, Percebois 2007b], [Chevalier, 2008]

<sup>2</sup> La dépendance à l'égard des importations du gaz naturel de l'UE-25 passera à 84% en 2030 (93% pour le pétrole). La dépendance énergétique totale passera de 56% en 2006 à 65% en 2030 [Percebois, 2007c].



## 2. Le contexte énergétique et environnemental global

### 2.1. L'énergie et l'environnement : de quoi parle-t-on ?

#### 2.1.1. L'Europe dans un monde énergétique en forte croissance

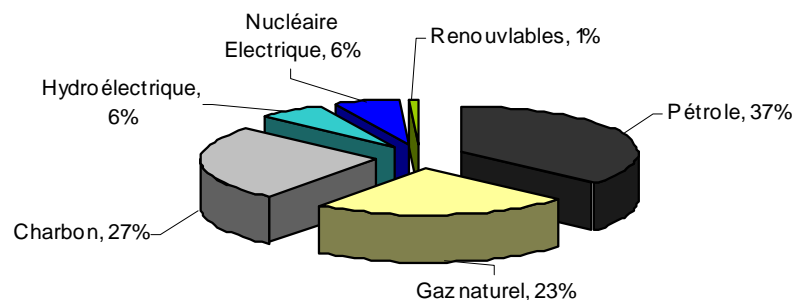
« Gros consommateur, petit producteur déclinant, l'Europe est de plus en plus dépendante de ses importations d'énergie fossiles » [Institut Montaigne, 2007].

Rappelons tout d'abord les chiffres essentiels établissant la situation énergétique européenne dans un contexte mondial.

##### 2.1.1.1. Un Monde énergétique hétérogène

En 2005, la consommation mondiale d'énergie primaire<sup>3</sup> s'est établie à 11 milliards de tep (tonnes équivalent pétrole) alors qu'elle était de 8 milliards en 1990, soit une hausse de 37,5% au cours de cette période.

En terme de part de marché : Le pétrole est la source d'énergie la plus courante avec près de 37% des parts et ce, surtout à cause du secteur du transport. Il est suivi par le charbon (27%) et le gaz naturel (23%). Le nucléaire représente un peu moins de 6% du marché mondial, l'hydroélectricité et autres énergies renouvelables environ 8%.



Réalisé à partir de EIA/DOE<sup>4</sup>

**Figure 1 : Consommation mondiale d'énergie par source en 2005**

La répartition de la consommation d'énergie par grande région géographique, fait ressortir l'Amérique du Nord comme le plus gros consommateur d'énergie dans le monde, l'Europe s'accapare la troisième place après l'Asie (Figure 2).

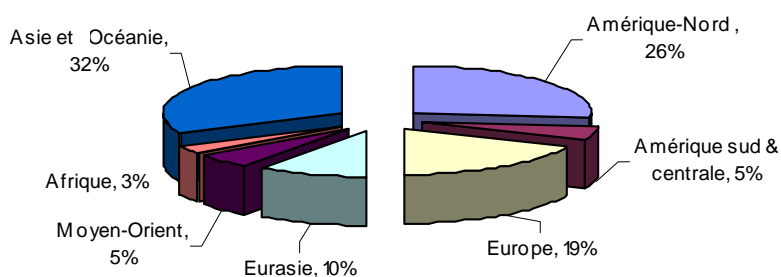
<sup>3</sup> L'énergie brute consommée, désignant l'énergie non transformée après extraction.

<sup>4</sup> <http://www.eia.doe.gov/>

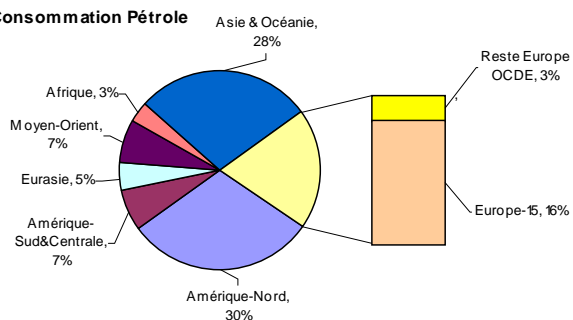
Selon le World Energy Outlook 2007, cette consommation sera en forte croissance dans les années à venir. La demande mondiale en énergie primaire augmentera d'environ 1,8% par an entre 2005 et 2030 (Charbon 2,2%, Pétrole 1,3%, Gaz 2,1%). La demande énergétique en Chine et en Inde devrait connaître une hausse annuelle moyenne respectivement de 3,2% et 3,6% durant la même période [World Energy Outlook, 2007]. Selon la même source, la croissance de la demande en Inde et en Chine fera augmenter la demande mondiale de 45% en 2030.

En termes de réserves d'énergie fossile dans le monde, le charbon tient le haut du pavé avec des réserves estimées à plus de 900 milliards de tonnes, ce qui représente 65% des réserves d'énergie fossile. Le rythme actuel de consommation permet une marge d'exploitation de plus de 150 ans. Les réserves de pétrole sont estimées à un peu plus de 1100 milliards de barils, ce qui représente 18% des réserves d'énergies fossiles. Le rythme actuel de consommation permet une disponibilité d'exploitation des ressources de près de 40 ans. Les réserves de gaz naturel sont estimées en 2005 à 177 912 milliards de m<sup>3</sup>, ce qui représente 17% des réserves d'énergies fossiles. Le rythme actuel de consommation permet une possibilité d'exploitation de 60 ans. L'ensemble de ces réserves, notamment le pétrole et le gaz naturel, se situe dans des zones géographiques instables économiquement et politiquement. Plus de 70% des ces réserves se localisent au Moyen-Orient, en Russie et en Afrique.

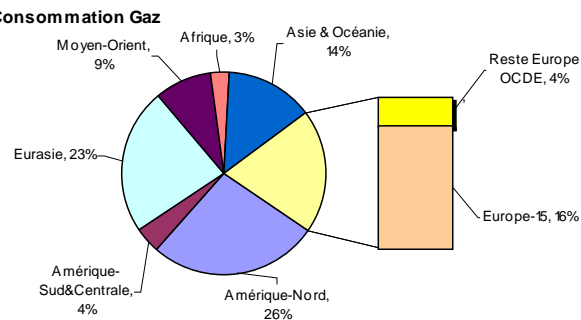
### Total Energie



### Consommation Pétrole



### Consommation Gaz



Réalisé à partir de EIA/DOE

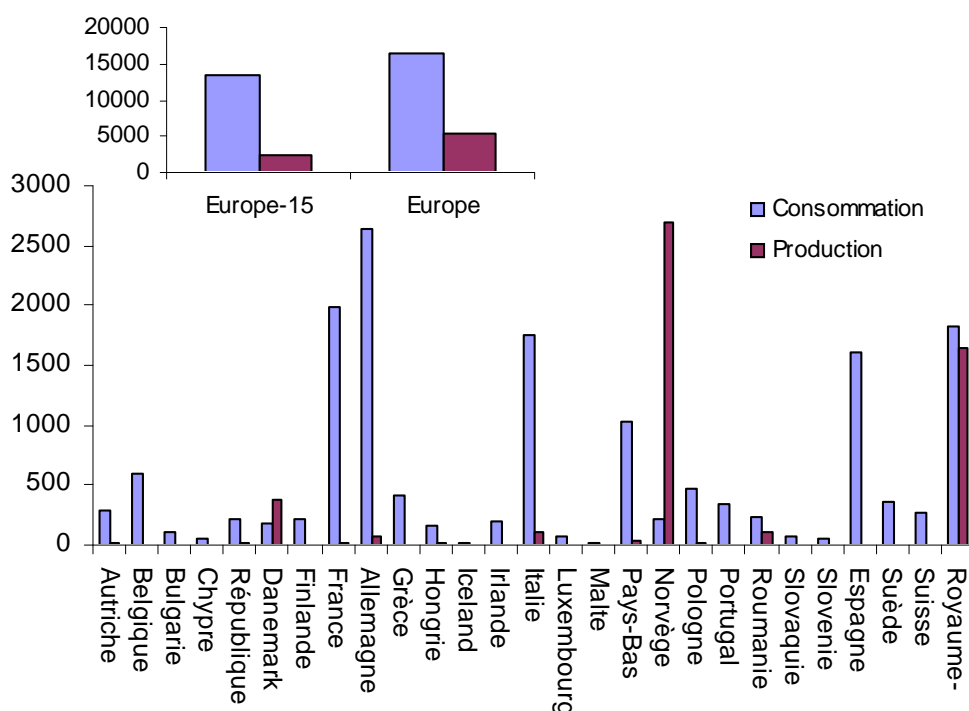
**Figure 2 : Répartition géographique de la consommation d'énergie en 2005**

### 2.1.1.2. L'Europe manque d'énergie

La consommation globale en énergie primaire européenne<sup>5</sup> représente trois fois sa production, elle s'est établie en 2005 à 2 milliards de tep.

Du point de vue géographique, la répartition de consommation énergétique<sup>6</sup> montre que l'Allemagne est le plus gros consommateur d'énergie, avec une part de 18%. La France consomme plus de 14%. Le Royaume-Uni plus de 12%, l'Italie 10% et l'Espagne plus de 8%.

La production de pétrole représente 7% de la production mondiale soit 5 millions de Barils/jour. Cette production est concentrée à 85% (du total Europe) en Norvège et au Royaume-Uni (Figure 3).



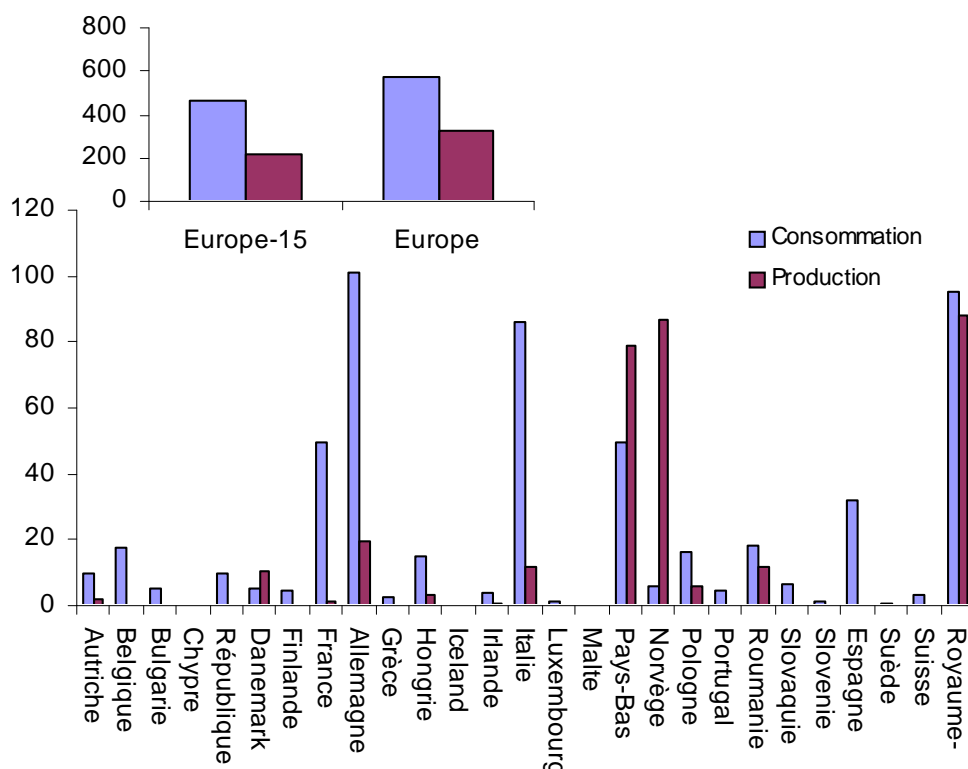
Réalisé à partir de EIA/DOE

**Figure 3 : Consommation de pétrole par pays en Europe (10<sup>3</sup>baril/jour) en 2005**

La production européenne de gaz naturel, représente 11% de la production mondiale. Elle est concentrée à 80% au Royaume-Uni, en Norvège et aux Pays-Bas.

<sup>5</sup> Europe des 24 plus la Norvège et la Suisse. La Lituanie, Lettonie et l'Estonie non compris.

<sup>6</sup> Total énergie primaire



Réalisé à partir de EIA/DOE

**Figure 4 : Consommation de gaz naturel en milliard de m³ en 2005.**

En Europe les réserves en pétrole représentent moins de 1,5% des réserves mondiales, celles du gaz 3% et le charbon moins de 7%. Si aucune mesure n'est prise pour améliorer l'efficacité énergétique, l'Europe devra importer, selon les prévisions de l'AIE [Energy Outlook, 2006], 70% de ses besoins en énergie en 2030, contre 50% actuellement. Ce constat alarmant était déjà tracé dans le livre vert de la Commission Européenne en 2000.

### 2.1.2. Le réchauffement climatique : un problème urgent

La canicule qui a sévèrement touché l'Europe pendant l'été 2003 est une des nombreuses manifestations du réchauffement climatique. Au niveau mondial, les années 1995-2006 ont été les douze années les plus chaudes<sup>7</sup> depuis que l'on enregistre les températures mondiales à l'aide d'instruments en 1850 [GEO-4, 2007]. En l'absence de décisions efficaces, la montée de la température moyenne de la surface de la terre sera comprise entre 1,8°C et 4°C depuis les années 80 jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> Siècle, selon un récent rapport du groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC, 2007]. Au cours de cette même période, le niveau des mers<sup>8</sup> s'élèvera de 18 à 59 centimètres, en raison de la fonte des glaces.

<sup>7</sup> L'année 1998 est l'année la plus chaude, L'organisation météorologique mondiale classe 2007 comme étant la 7<sup>ème</sup> année la plus chaude.

<sup>8</sup> Si ce réchauffement persiste pendant de nombreux siècles, la calotte glacière de Groenland pourrait fondre intégralement, provoquant ainsi une augmentation du niveau moyen des mers de quelques 7 mètres. En effet inverse, la fonte de la banquise aboutit à remplacer un milieu très réfléchissant par un milieu qui absorbe plus et renvoie moins d'énergie (Groupe de

Tous ces bouleversements affectent le fonctionnement des écosystèmes, entraînant la multiplication des catastrophes naturelles avec des amplitudes de plus en plus fortes : la répartition des différentes espèces animales changera et certaines d'entre elles disparaîtront. Les régimes de précipitation se modifieront, ce qui perturbera l'approvisionnement en eau et l'irrigation de nombreuses régions. Les phénomènes météorologiques extrêmes et les inondations se multiplieront, avec des répercussions importantes en termes de coûts économiques et de souffrances humaines. Les pays en développement seront particulièrement touchés par ces évolutions et les maladies tropicales gagneront du terrain [GRACES, 2006, CPM, 2006]<sup>9</sup>.

## **2.2. La politique énergétique européenne**

Compte tenu des problèmes liés au réchauffement climatique, il est de plus en plus important et urgent que l'UE mette en place une politique énergétique intégrée, efficace et commune qui réponde aux exigences de ces défis majeurs. La politique énergétique européenne doit donc prendre en compte trois éléments majeurs :

- La réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- La sécurité d'approvisionnement et la dépendance à l'égard des importations énergétiques.
- La croissance économique et la compétitivité à l'international.

### **2.2.1. Limiter les émissions de CO<sub>2</sub> est un défi incontournable**

La nécessité de lutter contre le changement climatique est progressivement prise en compte par la communauté internationale qui s'est dotée de plusieurs outils.

Sur les trois traités<sup>10</sup> internationaux connus, deux sont essentiels et se fondent sur la démarche de réduction des émissions de gaz à effet de serre : Le protocole de Kyoto et La directive européenne sur les quotas d'émission de gaz à effet de serre

#### **2.2.1.1. Le protocole de Kyoto comme engagement mondial**

Après le sommet de la terre à Rio de Janeiro en 1992, qui a marqué la prise de conscience internationale du risque de changement climatique, les pays membres de la CCNUCC adoptent le 11 décembre 1997 au Japon le protocole de Kyoto. Ce dernier fixe des valeurs limites juridiquement contraignantes pour les émissions de gaz à effet de serre des pays industrialisés. En vertu de son article 3.1, les pays de l'annexe I doivent réduire durant la période 2008-2012 leurs émissions de six gaz, notamment le dioxyde de carbone, le méthane, les halocarbures, le protoxyde d'azote et l'hexafluorure de soufre, de 5,2% en moyenne par rapport aux niveaux de 1990 [Rich, 2003]. Le protocole de Kyoto prévoit en outre trois mécanismes de flexibilité :

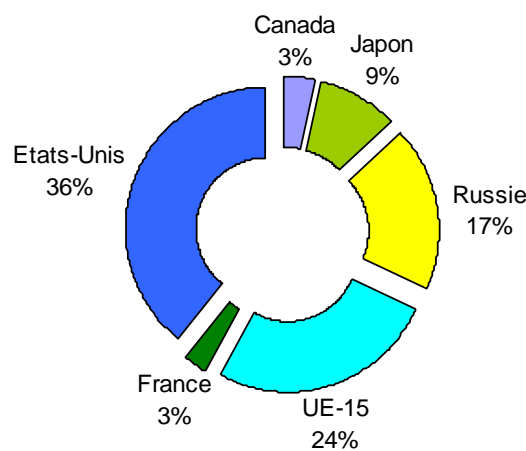
---

réflexion Académies et Conseil économique et Social, 2006)

<sup>9</sup> <http://whc.unesco.org/uploads/news/documents/news-262-3.doc>, [http://www.changement-climatique.fr/Le\\_changement\\_climatique\\_Acamedies-CES.pdf](http://www.changement-climatique.fr/Le_changement_climatique_Acamedies-CES.pdf)

<sup>10</sup> Parmi les trois traités, La Convention des Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CNUCC), adoptée le 09 mai 1992 à Rio de Janeiro, reconnaît l'existence de risques liés au réchauffement climatique et fixe l'objectif de stabiliser « les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique »

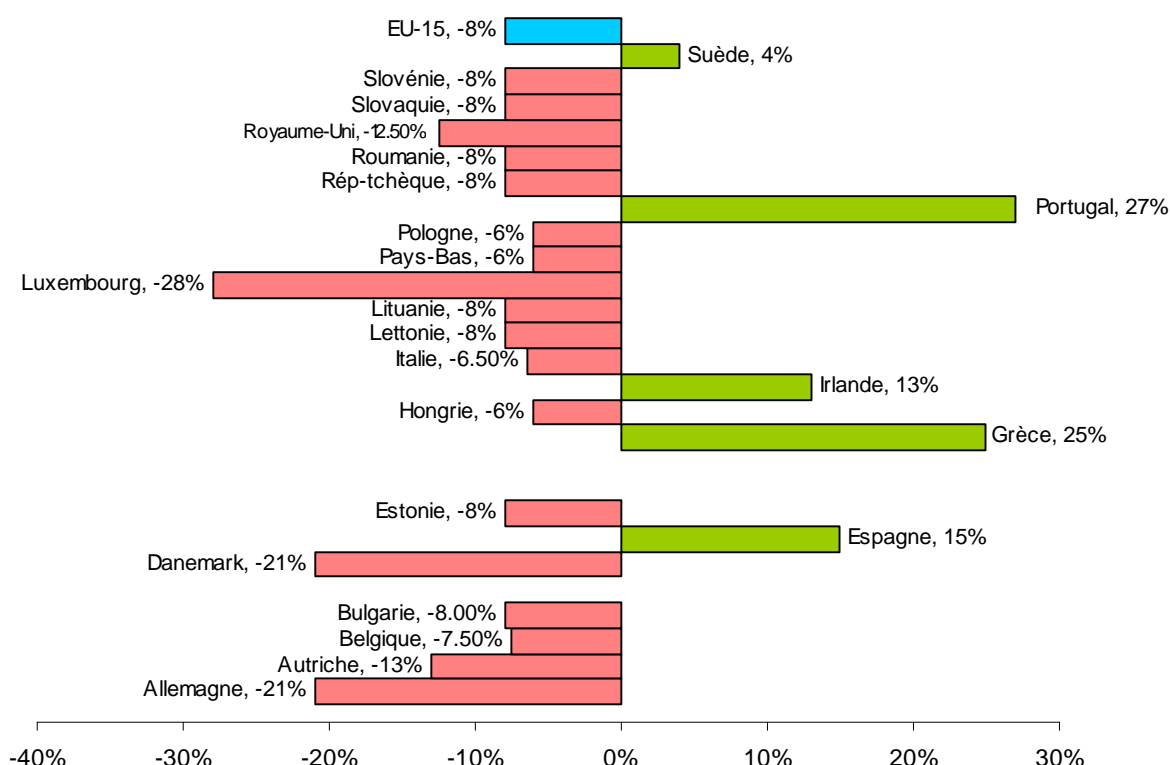
- Les "**Permis d'Emission Négociables**" (PEN), cette disposition permet de vendre ou d'acheter des droits à émettre entre pays industrialisés,
- La "**mise en œuvre conjointe**" (MOC) qui permet, entre pays développés de procéder à des investissements visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre en dehors de leur territoire national et de bénéficier des crédits d'émission générés par les réductions ainsi obtenues,
- Le "**mécanisme de développement propre**" (MDP), proche du dispositif précédent, à la différence que les investissements sont effectués par un pays développé, dans un pays en développement.



Source : Réalisée à partir de [Eschenbrenner, 2007]

**Figure 5 : Répartition des émissions de CO<sub>2</sub> par pays de l'annexe I**

L'entrée en vigueur du protocole de Kyoto était soumise à une condition : l'article 25.1 stipule que le traité doit être ratifié par au moins 55 pays dont les émissions de CO<sub>2</sub> représentaient en 1990 au moins 55% du volume total des pays de l'annexe. Après le refus des Etats-Unis en 2001 et la Russie en 2003 de ratifier le protocole, l'espoir quant à une éventuelle application était maigre. En 2004 la Russie accepta finalement de ratifier le protocole de Kyoto, ce qui a permis son entrée en vigueur le 16 février 2005.



Réalisé à partir de European Environment Agency

**Figure 6 : Répartition des efforts de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans le cadre du protocole de Kyoto par pays, UE-27**

Au titre du protocole de Kyoto, l'UE s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 8% au cours de la période 2008-2012, dite "première période d'engagement". Un accord communautaire, visant à répartir cette charge entre les Etats membres, fixe des objectifs pour chacun d'entre eux (Figure 6). Les quinze ont ratifié le protocole de Kyoto le 31 mai 2002. Les autres pays qui ont adhéré à l'UE ont également tous ratifié ce traité.

#### 2.2.1.2. La directive européenne dans la nécessité de réduire ses émissions de gaz à effet de serre

Afin d'honorer les engagements pris dans le cadre du protocole de Kyoto, l'UE a par ailleurs mis en place son propre système d'échange de quotas<sup>11</sup> d'émission établi par la directive 2003/87/CE votée au Parlement européen en juillet 2003<sup>12</sup>. Ces échanges ont débuté en 2005 pour les vingt-cinq Etats membres de l'UE élargie et les deux autres par la suite.

Un plafond d'émission est fixé pour chaque installation dans le cadre d'un plan national d'allocation de quotas (PNAQ) présenté par les Etats membres et approuvé par la Commission<sup>13</sup>. Les entreprises dépassant leurs quotas peuvent acheter des crédits inutilisés

<sup>11</sup> Le droit d'émettre une tonne de dioxyde de carbone ou de tout autre gaz à effet de serre d'effet équivalent au cours d'une période spécifiée.

<sup>12</sup> En France : L'ordonnance n° 2004-330 du 15 avril 2004 a transposé les grands principes de la directive 2003/87.

<sup>13</sup> La directive ne fixe que des principes généraux et la manière dont les quotas sont attribués relève d'une grande liberté.

auprès d'établissements plus performants sur le plan environnemental. Si elles ne sont pas dans la mesure de restituer autant de quotas que d'émissions constatées, elles doivent payer une amende de 40 euros par tonne de CO<sub>2</sub> excédentaire au cours de la première période (2005-2007) et 100 euros durant la deuxième période (2008-2012)<sup>14</sup> [Directive 2003/87/CE]. Le système communautaire d'échange de quotas d'émission (SCEQE), ne couvre que le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), ainsi qu'un nombre de secteurs d'activité fortement émetteurs en CO<sub>2</sub>, la production d'énergie et l'industrie (voir tableau ci-dessous).

Selon ce système, plusieurs entreprises à forte consommation d'énergie peuvent acheter et vendre des crédits d'émissions pour émettre des gaz à effet de serre, ce qui représente environ 46% du volume total des émissions de CO<sub>2</sub> au niveau européen [Oberndorfer, 2006 ; Dornau, 2005, Egenhofer, 2007].

D'autres gaz à effet de serre ainsi que des secteurs entiers fortement émetteurs en gaz carbonique, demeurent pour l'instant hors du champ d'application de la directive<sup>15</sup>.

Activités	Secteurs / Installations	seuils
Secteur de l'énergie	Installations de combust. Raffineries Cokeries	> 20 MW
Production et transformation de métaux ferreux	Grillage-frittage minéral Fonte et Acier	y.c. coulée cont. > 2,5 t/h
Industrie minérale	Ciment Chaux Verre (y.c. fibres de v.)	> 50 t/j (f. rot. > 500 t/j) > 50 t/j > 20 t/j
	Tuiles-Briques et céramiques	> 75 t/j et/ou 4m <sup>3</sup> et 300 kg/m <sup>2</sup>
Autres activités	Pâte à papier Papier-carton	> 20 t/j

Réalisé à partir de la Directive 2003/87/CE

**Tableau 1: Secteurs d'activités concernés par le SCEQE**

### 1. Lien avec les mécanismes souples du protocole de Kyoto

L'élément essentiel du SCEQE est la possibilité de se lier aux mécanismes souples du protocole de Kyoto, « MOC » et « MDP » (voir section 2.2.1). Par conséquent, la directive 2003/87/CE n'autorisait pas la cession des crédits d'émissions générés par les projets MOC/MDP sur le marché européen des quotas d'émission. La directive 2004/101/CE modifiant la directive 2003/87/CE, établit précisément un lien entre le SCEQE et les

---

Chaque État membre élabore un plan national respectant les critères de l'annexe III de la directive et indiquant les quotas qu'il a l'intention d'accorder pour la période définie ainsi que la manière dont il pense les attribuer à chaque installation.

<sup>14</sup> Le paiement de l'amende sur les émissions excédentaires ne libère pas l'exploitant de l'obligation de restituer un nombre de quotas égal à ces émissions excédentaires lors de la restitution des quotas correspondant à l'année civile suivante (Article 16).

<sup>15</sup> Le protoxyde d'azote, le méthane. Le secteur du transport et le bâtiment.

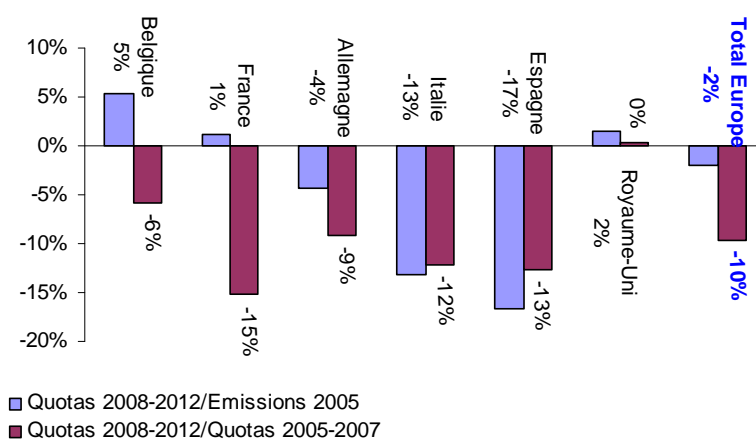


mécanismes mis en place par le protocole de Kyoto<sup>16</sup>. Aujourd'hui on dénombre 147 pays liés à ce système au travers de projets MOC/MDP [COM(2008) 16].

## 2. Période d'échange 2008-2012

En 2005 et 2006, les émissions ont été inférieures aux quotas alloués, à hauteur respectivement de 4 % et 2 % [CPCI, 2007]. Cela a conduit la Commission européenne à se montrer sensiblement plus exigeante concernant les allocations des États membres pour la seconde période de la directive (2008- 2012)<sup>17</sup>.

Le 26 octobre 2007, la Commission a annoncé l'établissement du nouveau plafond européen de CO<sub>2</sub> à 2,039 milliards de tonnes pour la période 2008-2012 [IP/07/1612]. Ce chiffre représente une réduction de 10 % par rapport à ce que les Etats membres avaient demandé<sup>18</sup>.



Réalisé à partir de EU press release IP/07/1612<sup>19</sup>

**Figure 7 : Répartition PNAQ 2008-2012**

Au total, les plafonds d'émissions approuvés par la Commission sont de 2 % inférieurs aux émissions de 2005. Cette contrainte varie cependant par pays en fonction de leurs possibilités supposées de réduction de l'intensité en carbone de leur production et de leur croissance prévue à horizon 2012 (voir graphe ci-dessous).

En France, le PNAQ II a été approuvé le 26 mars 2007, il alloue 133 Mt d'équivalent CO<sub>2</sub> par an, soit 15% de moins que la première période (PNAQ I).

La seconde période de la directive prévoit notamment certaines nouveautés :

- Une partie des quotas sera mise aux enchères à hauteur de 10% pour l'ensemble de l'UE.

<sup>16</sup> En France : La directive 2004/101/CE, a été transposée en droit français en 2005. La loi n°2005-1319 du 26 octobre 2005, assure la transposition des dispositions d'ordre législatif. Le décret 2006-622 du 29 mai 2006 précise les types de crédits d'émission pouvant être utilisés et la procédure définitive d'agrément des projets par les pouvoirs publics. L'arrêté du 29 mai 2006 précise les conditions d'obtention de l'agrément pour les projets de production hydroélectrique de plus de 20 MW [Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'emploi, DGEMP, 2007].

<sup>17</sup> La seconde période de la directive coïncide avec la période au cours de laquelle les engagements de Kyoto doivent être remplis.

<sup>18</sup> Les Etats membres ont demandé un quota quasi égal à celui de la première période.

<sup>19</sup> <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/07/1612>

- Le marché européen est relié au système d'échange de la Norvège, de l'Islande et de Liechtenstein [IP/O7/1617]

### 3. Révision du système européen d'échange de quotas d'émission à partir de 2013

Le groupe de travail sur les échanges d'émissions du programme européen sur le changement climatique affirme la nécessité de la révision du SCEQE [COM(2008) 16]<sup>20</sup>. La révision de la directive visera à étendre le système européen d'échange de quotas d'émission à d'autres secteurs et à des gaz à effet de serre autre que le dioxyde de carbone.

La proposition de directive [COM(2008) 16] établit un certain nombre d'éléments principaux du nouveau système, qui entrera en vigueur en 2013 :

**Champ d'application :** le système sera étendu aux émissions de CO<sub>2</sub> liées aux produits pétrochimiques, à l'ammoniac et à l'aluminium. Il en va de même pour les émissions de N<sub>2</sub>O provenant de la production d'acide nitrique, adipique et glyoxylique, ainsi que des émissions de PFC<sup>21</sup> provenant de secteur de l'aluminium. Le système n'est étendu qu'aux émissions qui peuvent être surveillées, déclarées et vérifiées. Cependant, le secteur des transports routier et maritime<sup>22</sup>, l'agriculture et la sylviculture sont exclus. Le seuil des 20 MW sera associé à un seuil d'émissions de 10 000 t de CO<sub>2</sub>/an<sup>23</sup>.

**Le plafond sur les émissions :** l'ensemble des émissions européenne sera limité à 21% en 2020 par rapport au niveau de 2005, le nombre total de quotas d'émissions en circulation à la fin de 2012 sera augmenté de 1,74% chaque année.

**Vente aux enchères :** la proposition prévoit une augmentation considérable des ventes aux enchères dès 2013. Globalement, le texte estime qu'au moins deux tiers de la quantité totale de quotas seront mis aux enchères en 2013. Par conséquent, la mise aux enchères intégrale sera la règle pour le secteur de l'électricité. Les producteurs d'électricité pourraient cependant recevoir des quotas gratuits pour la chaleur destinée au réseau de chauffage urbain et aux installations industrielles. Pour les autres secteurs, les quotas subiront une réduction d'une quantité égale d'année en année à partir de 2013, de telle sorte qu'aucun quota gratuit ne sera plus alloué en 2020. Néanmoins, certains secteurs industriels à forte intensité d'énergie qui sont susceptibles d'être exposés à des « fuites de carbone »<sup>24</sup> pourraient continuer d'obtenir gratuitement tous leurs quotas à long terme.

---

<sup>20</sup> La même source annonce qu'il convient que la directive prévoie l'application d'ajustements automatiques et prévisibles après la conclusion d'un futur accord international.

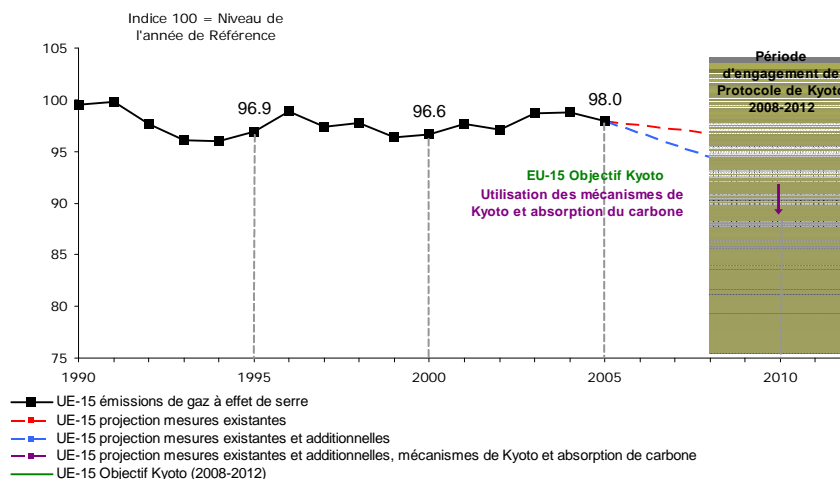
[http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/pdf/com\\_2008\\_16\\_fr.pdf](http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/pdf/com_2008_16_fr.pdf)

<sup>21</sup> Perfluorocarbures

<sup>22</sup> Le transport maritime pourra être inclus ultérieurement

<sup>23</sup> Hors émissions provenant de la biomasse et dans la limite des 25 MW.

<sup>24</sup> Risque de délocalisation dans des pays tiers. En l'absence de contraintes imposées aux industries de pays tiers, il se peut qu'apparaisse **un risque de fuite de carbone**, cela signifie la délocalisation d'activités à fort taux d'émission de gaz à effet de serre de l'UE vers les pays tiers, ce qui aurait pour effet l'augmentation des émissions mondiales.



Source : European Environment Agency

**Figure 8 : Projection des émissions de l'UE-15 comparées aux objectifs de Kyoto 2008-2012**

La Figure 8 ci-dessus montre les projections des émissions de CO<sub>2</sub> de l'UE des quinze par rapport aux mesures prises en compte actuellement. Cela signifie que les mesures existantes ne peuvent en aucun cas atteindre les objectifs de Kyoto.

## 2.2.2. Faire face à la dépendance énergétique est une nécessité grandissante

### 2.2.2.1. Prise de conscience de la dépendance énergétique

Nous listons ci-dessous les différents éléments et actions montrant la prise de conscience par l'Europe de sa dépendance énergétique.

Le **livre vert de novembre 2000 sur la sécurité d'approvisionnement énergétique**<sup>25</sup> a posé les premières étapes de la politique énergétique européenne. Il fait le point sur l'ensemble des besoins énergétique de l'UE, sans pour autant trancher sur les choix à faire par les Etats membres, pour assurer leur indépendance énergétique. Ce livre vert propose des orientations et montre que la dépendance à l'égard de sources extérieures d'énergie devrait croître.

Le **livre vert de juin 2005 sur l'efficacité énergétique**<sup>26</sup> identifie les barrières à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Il propose cependant d'engager de nouvelles actions dans chacun des secteurs économiques gros consommateurs d'énergie. Par ce livre vert, la commission cherche à organiser une consultation publique à grande échelle. Ce document retrace un certain nombre d'options sur lesquelles elle sollicite l'avis des institutions.

<sup>25</sup> Livre vert de la Commission du 29 Novembre 2000 : « Vers une Stratégie Européenne de sécurité d'approvisionnement » [www.ec.europa.eu/energy/green-paper-energy-supply/doc/green\\_paper\\_energy\\_supply\\_fr.pdf](http://www.ec.europa.eu/energy/green-paper-energy-supply/doc/green_paper_energy_supply_fr.pdf)

<sup>26</sup> Livre vert de la Commission du 22 juin 2005 : « l'efficacité énergétique ou comment consommer mieux avec moins » [www.energie-cites.eu/IMG/pdf/2005\\_06\\_green\\_paper\\_text\\_fr.pdf](http://www.energie-cites.eu/IMG/pdf/2005_06_green_paper_text_fr.pdf)

La **Directive 2005/32/CE du Parlement européen et du Conseil**<sup>27</sup> définit les principes, conditions et critères fixant les exigences environnementales que les produits consommateurs d'énergie doivent remplir pour leur mise sur le marché et/ou en service. Pour autant, cette directive ne prévoit pas de dispositions directement contraignantes pour des catégories de produits spécifiques, mais énonce plutôt des conditions et des critères relatifs aux caractéristiques environnementales et énergétiques des produits. En principe, la directive s'applique à tout produit utilisant de l'énergie et qui est mis sur le marché européen ou importé, hors les moyens de transport de personnes ou de marchandises. L'objectif principal de cette directive est d'assurer la libre circulation des produits consommateurs d'énergie au sein du marché intérieur de l'UE, et par ailleurs à améliorer leur efficacité énergétique.

Le **Mémoire français**<sup>28</sup> sensibilise les institutions européennes sur un certain nombre de mécanismes mis en œuvre en France : réflexion prospective sur la sécurité d'approvisionnement, amélioration de l'efficacité énergétique et le développement du nucléaire. Ce mémoire proposait également une politique énergétique commune.

Le **livre vert de mars 2006 sur la politique européenne de l'énergie**<sup>29</sup> lance le débat sur une future politique européenne commune dans le domaine de l'énergie, permettant ainsi à l'UE de s'exprimer d'une seule voix sur la scène internationale. Il suggère, entre autres, d'harmoniser le marché intérieur de l'énergie, d'intensifier les relations avec les principaux fournisseurs d'énergie comme la Russie et l'OPEP, d'utiliser des énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et de faire la recherche sur les technologies faibles en carbone.

La **Directive 2006/32/CE du Parlement européen et du Conseil**<sup>30</sup> a pour objectif de rendre l'utilisation finale d'énergie plus économique et plus efficace. La directive vise la vente au détail, la fourniture et la distribution des grands vecteurs énergétiques dépendant d'un réseau, comme l'électricité et le gaz naturel, ainsi que d'autres types d'énergie à l'exclusion des activités soumises au système d'échange de quotas de gaz à effet de serre. En terme d'objectif, les Etats membres doivent atteindre une économie d'énergie de 9% d'ici 2015. Ils doivent également se fixer un objectif indicatif national intermédiaire à atteindre en 2009. En France, cette directive impacte directement EDF.

La **Communication de la Commission, « Plan d'action pour l'efficacité énergétique »**<sup>31</sup> fixe les actions d'une utilisation rationnelle de l'énergie. Le plan propose d'agir de façon ciblée sur la consommation et l'approvisionnement, afin de parvenir à économiser 20% de la consommation annuelle d'énergie primaire d'ici à 2020<sup>32</sup>.

---

<sup>27</sup> Directive 2005/32/CE du parlement européen et du conseil, du 06 juillet 2005, établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits consommateurs d'énergie [www.europa.eu.int/eur-lex/lex/LexUriServ/site/fr/oj/2005/l\\_191/l\\_19120050722fr00290058.pdf](http://www.europa.eu.int/eur-lex/lex/LexUriServ/site/fr/oj/2005/l_191/l_19120050722fr00290058.pdf)

<sup>28</sup> Mémoire de la France pour une relance de la politique énergétique européenne dans une perspective de développement durable, Janvier 2006  
[www.diplomatie.gouv.fr/fr/IMG/pdf/Memoire\\_francais\\_sur\\_l\\_energie\\_dans\\_une\\_perspective\\_de\\_developpement\\_durable.pdf](http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/IMG/pdf/Memoire_francais_sur_l_energie_dans_une_perspective_de_developpement_durable.pdf)

<sup>29</sup> Livre vert de la Commission, du 08 mars 2006 : « Une stratégie européenne pour une énergie sûre compétitive et durable »  
[www.ec.europa.eu/maritimeaffairs/pdf/com\\_2006\\_0275\\_fr\\_part2.pdf](http://www.ec.europa.eu/maritimeaffairs/pdf/com_2006_0275_fr_part2.pdf)

<sup>30</sup> Directive 2006/32/CE du Parlement européen et du Conseil, du 05 avril 2006 relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques  
[http://www.ecoresponsabilite.environnement.gouv.fr/article.php3?id\\_article=330](http://www.ecoresponsabilite.environnement.gouv.fr/article.php3?id_article=330)

<sup>31</sup> Communication de la commission, du 19 octobre 2006 : « Plan d'action pour l'efficacité énergétique : réaliser le potentiel » [www.eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/fr/com/2006/com2006\\_0545fr01.pdf](http://www.eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/fr/com/2006/com2006_0545fr01.pdf)

<sup>32</sup> Par rapport aux projections de la consommation énergétique pour 2020.

**La Communication de la Commission au Conseil Européen et au Parlement Européen, « Une politique énergétique pour l'Europe »**<sup>33</sup> introduit le paquet intégré de mesures définissant la politique européenne de l'énergie. Ces mesures portent sur les mêmes axes : un marché intérieur de l'énergie concurrentiel, intégré et interconnecté ; assurer la sécurité d'approvisionnement énergétique et limiter les émissions de gaz à effet de serre. En outre, elle reconduit l'objectif fixé par la communication de la commission : « plan d'action pour l'efficacité énergétique ». De plus, dans de cette communication l'UE s'engage à réduire ses émissions internes de 20% au moins d'ici 2020. Elle appelle par ailleurs à la conclusion d'un accord international par lequel les pays développés s'engageraient à réduire de 30% leurs émissions de gaz à effet de serre d'ici 2020 (Cet aspect est déjà développé au troisième point de la section 2.2.1.2). En termes d'énergie renouvelable, cette communication fixe un objectif contraignant de porter la part des énergies renouvelables à 20% de sa palette énergétique d'ici 2020.

Les **conclusions de la présidence du Conseil européen de Bruxelles**<sup>34</sup> réaffirment globalement les engagements pris dans le cadre de la communication de la commission « Une politique énergétique pour l'Europe ».

En France, l'ensemble des directives européennes sur la maîtrise d'énergie et l'environnement devrait être transposées en droit français pour leur mise en application. La loi POPE<sup>35</sup> et son titre II sur la maîtrise de l'énergie ainsi que ses décrets d'application, instaurent **un système de certificats d'économie d'énergie** avec un objectif national de 54 TWh cumac<sup>36</sup> de 2006 à 2008 (une obligation pour EDF de réaliser 30TWh cumac). La pénalité en France est fixée à 2c€/kWh cumac manquant. Ce même titre transpose également la directive européenne 2002/91/CE sur la performance énergétique des bâtiments.

#### 2.2.2.2. Les voies d'action

Les voies d'action pour remédier aux problèmes liés à l'approvisionnement énergétique sont rapportées par l'ensemble des dispositions de la Commission Européenne. Ces actions sont globalement orientées vers l'efficacité énergétique et l'utilisation des énergies renouvelables<sup>37</sup>.

#### L'efficacité énergétique

Economiser de l'énergie là où les potentialités se trouvent et sous toutes leurs formes est l'une des réponses les plus évidentes pour faire face aux besoins énergétiques croissants et continus. Améliorer le rendement des installations énergétiques ou procéder à des changements technologiques permettrait d'économiser les consommations de combustibles, de baisser les émissions de gaz à effet de serre, d'alléger la facture énergétique et aussi de réduire dans le meilleur des cas les investissements. L'efficacité énergétique est donc une option qui va dans

<sup>33</sup> Communication de la commission au Conseil européen et au Parlement européen, du 10 janvier 2007 : « Une politique de l'énergie pour l'Europe » [www.eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2007:0001:FIN:FR:PDF](http://www.eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2007:0001:FIN:FR:PDF)

<sup>34</sup> Conseil européen de Bruxelles 8-9 mars 2007, Conclusion de la Présidence [www.consilium.europa.eu/ueDocs/cms\\_Data/docs/pressData/fr/ec/93141.pdf](http://www.consilium.europa.eu/ueDocs/cms_Data/docs/pressData/fr/ec/93141.pdf). La même conclusion fixe des objectifs contraignants sur les sources d'énergies renouvelables (voir section 1.2.2.2.2)

<sup>35</sup> La loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique. [www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000813253&dateTexte](http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000813253&dateTexte)

<sup>36</sup> Cumulé actualisé sur la durée de vie du produit/service.

<sup>37</sup> Lors de sa résolution sur le changement climatique du 14 février 2007, le Parlement Européen a noté qu'une politique énergétique est un élément crucial pour une stratégie européenne globale en changement climatique, et dans laquelle l'efficacité énergétique et les sources d'énergies renouvelables jouent un rôle important.

le sens des objectifs de la Commission Européenne. « *Bien que l'efficacité énergétique se soit considérablement améliorée au cours des dernières années, il est encore possible, économiquement et techniquement, d'économiser au moins 20% de l'énergie primaire totale d'ici à 2020, en plus de ce qui a déjà été réalisé du fait des effets de prix des changements structurels dans l'économie, du remplacement "naturel" des technologies et des mesures déjà appliquées* » [COM(2006)545]. Selon la même source le potentiel d'économies d'énergie par secteur est réparti comme suit :

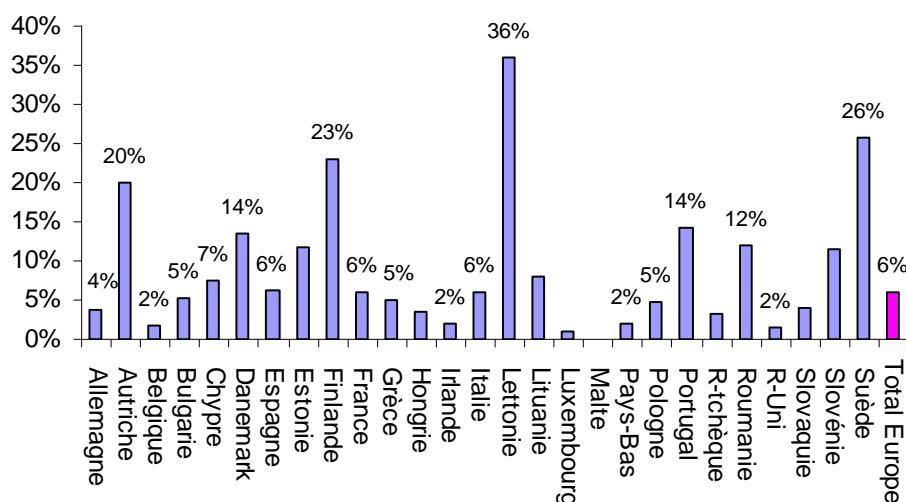
Secteur	Énergie consommée en 2005 (Mtep)	Énergie consommée en 2020 (Mtep)	Potentiel d'économie d'énergie en 2020 (Mtep)	Potentiel d'économies d'énergie dans sa totalité
Résidentiel	280	338	91	27%
Tertiaire	157	211	63	30%
Transport	332	405	105	26%
Industrie	297	382	95	25%

Source : [COM(2006)545].

**Tableau 2: Estimation du potentiel total d'économies d'énergie dans les secteurs d'utilisation finale**

### La promotion des énergies renouvelables

Outre leur contribution à la diminution des émissions de gaz à effet de serre, les énergies renouvelables présentent le double avantage de réduire la dépendance de l'UE vis-à-vis des importations extérieures et ainsi d'assurer la sécurité d'approvisionnement énergétique.



Réalisé à partir de Renewables in global energy supply, AIE, 2007

**Figure 9 : Répartition de la part des énergies renouvelables, l'UE-27 en 2004**



Dans le rapport de l'AIE « Renewables in global energy supply » publié en Janvier 2007, la part des énergies renouvelables représente 13,7 % de la consommation totale d'énergie primaire mondiale et 17,9% de la production électrique en 2004. Selon le scénario alternatif de World Energy Outlook 2006 de l'AIE, la part des énergies renouvelables restera stable à 14% en 2030 et atteindra 25% pour la production électrique.

Dans la perspective d'accroître la part des énergies renouvelables, l'UE a d'ores et déjà engagé plusieurs actions :

**En novembre 1997**, la Commission Européenne a publié un livre blanc<sup>38</sup> où elle s'est fixée comme objectif d'atteindre une pénétration minimale de 12% des sources d'énergies renouvelables dans la consommation intérieure brut de l'énergie de l'Union en 2010.

**En septembre 2001**, la directive 2001/77/CE<sup>39</sup>, fixe des objectifs nationaux sur tous les états membres, de la part de l'électricité produite à partir des sources d'énergies renouvelables (voir annexe de la directive). L'objectif global est de parvenir à 22% en 2010.

**En janvier 2007**, la communication de la Commission Européenne « Feuille de route pour les sources d'énergies renouvelables »<sup>40</sup> expose la stratégie de la Commission en matière d'énergies renouvelables. Elle fixe un objectif obligatoire de 20% pour la part des sources d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie de l'UE pour 2020.

**En mars 2007**, le sommet européen approuve la feuille de route de la commission (Conclusion de la présidence). Dans l'objectif général des 20%, il inclut un objectif minimum pour chaque Etat membre d'atteindre au moins une part de 10 % de biocarburant dans le transport. Ces objectifs ont été reconduits par le **projet de directive sur les énergies renouvelable**<sup>41</sup> **de janvier 2008**, le projet laisse le soin aux états membres de définir leurs feuilles de route respectives.

Nous voyons bien que l'UE a pris conscience de cette problématique et l'a intégrée dans sa politique. Nous passons maintenant à l'aspect mondialisation.

### 2.2.3. La mondialisation et la compétitivité à l'international : quel avenir pour la croissance économique?

#### 2.2.3.1. Cadre général de la croissance économique

**La croissance mondiale estimée à 4,1% en 2008.** Soutenue par la forte croissance industrielle de la Chine et de l'ensemble des pays émergents, la croissance de l'économie mondiale résiste au ralentissement économique des Etats-Unis<sup>42</sup>. Elle s'est établie en 2006 à 5,4%, contre 4,9% en 2005 [RA-FMI, 2007]. En 2008 les prévisions sont moins ambitieuses,

<sup>38</sup> Communication de la commission énergie pour l'avenir : les sources d'énergie renouvelables. Livre blanc établissant une stratégie et un plan d'action communautaires <http://ec.europa.eu/energy/res/legislation/doc/com599.htm>

<sup>39</sup> Directive du 27 septembre 2001, relative à la promotion de l'électricité produite à partir de source d'énergies renouvelables sur le marché intérieur de l'électricité [www.industrie.gouv.fr/energie/renou/directive-enr.pdf](http://www.industrie.gouv.fr/energie/renou/directive-enr.pdf)

<sup>40</sup> Communication de la Commission, du 10 janvier 2007, intitulée: "Feuille de route pour les sources d'énergies renouvelables. Les sources d'énergies renouvelables au 21<sup>ème</sup> Siècle : construire un avenir plus durable » [www.eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/fr/com/2006/com2006\\_0848fr01.pdf](http://www.eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/fr/com/2006/com2006_0848fr01.pdf)

<sup>41</sup> Proposition de Directive du Parlement Européen et du Conseil relatif à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables [www.eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0019:FIN:FR:PDF](http://www.eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0019:FIN:FR:PDF)

<sup>42</sup> Affaiblis par l'éclatement de la crise du « subprime ».

la croissance mondiale devrait passer de 4,9% en 2007 à 4,1% en 2008 soit 0,7% de moins que les prévisions de projections d'octobre 2007 [RP-FMI, 2007, 2008].

Malgré des cours de pétrole et de matières premières particulièrement forts, l'accroissement des échanges mondiaux reste maintenu. Depuis quatre ans, le volume progresse en moyenne de 7% par an [CPCI, 2007]. Les pays en développement : l'Asie, l'Afrique, le Moyen-Orient et aussi l'Amérique du Sud sont devenus les principaux moteurs des échanges mondiaux, ils couvrent en 2006, 43% des exportations mondiales, contre 35% en 2001 [CPCI, 2007].

**La zone euro est à la traîne.** Malgré des estimations à la hausse et une contribution significative à la croissance économique mondiale, la croissance économique européenne reste relativement faible en comparaison au niveau des années 90<sup>43</sup>. En 2006, marquée par la forte croissance de l'Allemagne et les nouveaux pays membres, la croissance économique européenne s'est établie à 2,9% soit 1,2% de plus que 2005 [Eurostat].

En France : Compte tenu de la crise financière mondiale, les prévisions de la croissance pour 2008 ont été revues à la baisse pour se stabiliser à 2% [ministère de l'économie].

#### 2.2.3.2. Compétitivité internationale et délocalisation

Sur la base des principes des politiques énergétiques et environnementales, les engagements pris en compte par les pays industrialisés, sont considérés comme étant des contraintes économiques supplémentaires. Le non approbation de ces engagements par les pays émergents entraîne un effet d'irrégularité des contraintes entre les pays.

Ces irrégularités font l'objet de plusieurs débats et suscitent l'inquiétude de l'opinion politique quant aux pertes de compétitivité internationale au bénéfice des pays émergents, en particulier la Chine et l'Inde.

Dans la logique de la mondialisation<sup>44</sup> des entreprises (les entreprises fonctionnent désormais dans un cadre mondial non plus dans un cadre national, voir européen), ces inquiétudes résultent souvent des problèmes liés au phénomène de délocalisation<sup>45</sup>. Certains secteurs de l'économie, en particulier l'industrie, fortement contraints par l'ensemble de ces politiques seront susceptibles de fermer ou de transférer une partie ou l'ensemble de leur production vers des pays à faibles contraintes (pays émergents). Cet aspect est caractérisé par deux conséquences majeures :

Un **impact direct sur la croissance économique**, qui s'explique par une perte de richesse, une forte réduction d'effectifs (pertes d'emplois) et une hausse des importations des produits similaires à ceux produit auparavant, ce qui abouti à un déséquilibre économique et commercial.

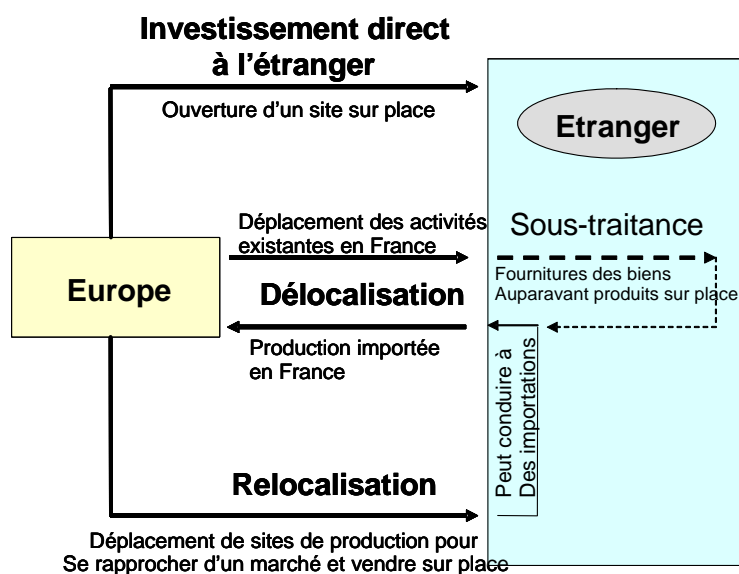
<sup>43</sup> L'Europe de l'ouest, les Etats-Unis et le Japon ont contribué à plus de la moitié de la croissance mondiale

<sup>44</sup> L'accélération sans précédent de la liberté de localisation des firmes dans l'espace mondial [El Mouhoub, 2008]. « *Mouvement complexe d'ouverture de frontières économiques permettant aux acteurs d'étendre leur champ d'action à l'ensemble de la planète. Ceci a fin de tirer profit des différentiels de dynamiques entre les différentes zones du globe et d'établir des visions d'ensemble* » [Ferrandéry, 1996]

<sup>45</sup> Une délocalisation peut être définie comme la décision par une entreprise ou un groupe d'entreprises de transférer une partie ou l'ensemble d'une activité à l'étranger, dans le but essentiel est la recherche des coûts de production faibles. Ce phénomène est doré et déjà engagé par un certains nombre d'entreprises qui sont généralement attirées par des régimes fiscaux compétitifs et des masses salariales à bas coût. Les politiques énergétiques et environnementales peuvent en effet accélérer ce processus et ainsi accroître son ampleur.



Des **fuites de carbone**, qui réduisent l'efficacité des politiques environnementales dans une dimension globale. La délocalisation d'un site de production d'un pays contraint par une politique environnementale vers un pays non contraint engendre des émissions de gaz à effet de serre qui échappent aux systèmes de quotas.



Source : réalisée à partir étude d'Ernst & Young réalisée pour la commission des finances du Sénat [Arthuis, 2005]

**Figure 10 : Une approche de la définition de la délocalisation**

On ne peut pas conclure que ces irrégularités pourraient mener à terme à la délocalisation de l'ensemble de l'industrie des pays industrialisés vers les pays émergents. Certaines limites relatives au degré des contraintes imposées, peuvent s'opposer à ce phénomène.

Dans le rapport de l'INSEE [G2005/03], les limites quant à la délocalisation sont associées :

- d'une part à des considérations de coûts. Par effet « Sunk costs »<sup>46</sup>, le déplacement d'une unité de production impliquerait de payer une seconde fois les coûts d'implantation.
- d'autre part l'éloignement de ces pays, génère des coûts de transports très élevés.

En France : Le phénomène de délocalisation aurait conduit à la suppression de 3,6% des effectifs industriels entre 1995 et 2003 [CPCI, 2007]. Le nombre d'emplois ainsi supprimés aurait légèrement progressé passant de 13 000 par an en moyenne entre 1995 et 1999 à 15 000 entre 2000 et 2003.

D'une manière générale, le constat dressé ci-dessus montre que l'étendue de l'impact des politiques énergétiques et environnementales et les conséquences des délocalisations dépendent fortement de l'importance des consommations énergétiques du secteur concerné. Par conséquent, dresser la structure des consommations énergétiques de l'industrie semble très important pour montrer l'intérêt porté à ce secteur.

<sup>46</sup> Coûts fixes irréversibles. Lorsque des unités de production existent déjà sur le territoire national, les coûts fixes d'implantation ont déjà été payés et ne peuvent pas, pour l'essentiel être récupérés par l'entreprise.

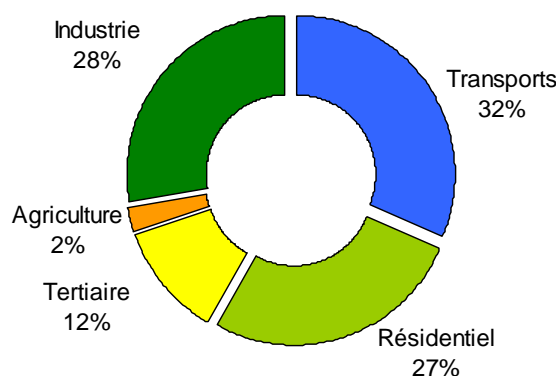
### 3. L'industrie et le cadre énergétique

#### 3.1. L'industrie européenne : structure et évolution

##### 3.1.1. Les secteurs de l'économie les plus consommateurs d'énergie

D'après les chiffres recueillis pour l'année 2006 par ENERDATA, la consommation totale d'énergie finale en Europe<sup>47</sup> s'élève à 1195 millions de tep (Mtep) hors usage non énergétique. La figure ci-dessous (Figure 11) illustre la répartition de la consommation énergétique entre les différents grands secteurs économiques en Europe<sup>48</sup>. L'industrie est le deuxième secteur plus gros consommateur d'énergie en Europe, après le secteur de transport.

En France<sup>49</sup> pour la même année et sur un total de 161,7 Mtep, l'industrie compte pour 23% de la consommation finale énergétique, devancée par le secteur de transport avec 31%. Le résidentiel et le tertiaire à eux deux représentent 44% et l'Agriculture 2%.



Réalisé à partir d' ENERDATA (GlobalStat 2007)

**Figure 11: Répartition des consommations d'énergie finale en Europe 2006 par grand secteur économique**

La lecture de ces données démontre l'importance de la consommation d'énergie dans le secteur industriel. Elle représente près d'un tiers de la consommation finale d'énergie.

##### 3.1.2. Une consommation d'énergie en croissance continue

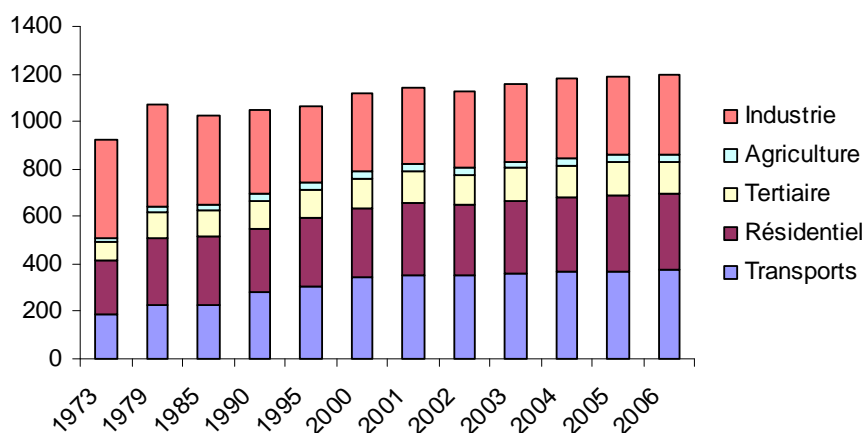
Lors du premier choc pétrolier, la consommation européenne en énergie finale s'élevait à 920 millions de tep. En 2006, elle dépasse les 1100 millions de tep. En trois décennies, la consommation d'énergie a donc globalement augmenté<sup>50</sup> de 23%, même si elle a connu une baisse dans les années 1980-1985 après le second choc pétrolier (Figure 12).

<sup>47</sup> Union Européenne à 27 membres.

<sup>48</sup> Europe-27 plus la Norvège et la Suisse

<sup>49</sup> Données corrigées du climat, « bilan énergétique de l'année 2005 en France », Observatoire de l'énergie, DGEMP.

<sup>50</sup> Sans prendre en compte l'effet de la croissance



Réalisé à partir d' ENERDATA (GlobalStat 2007)

**Figure 12 : Evolution de la consommation finale énergétique européenne par grand secteur économique, sur la période 1973-2006 en Mtep**

La croissance de la consommation d'énergie est principalement imputable aux secteurs des transports, du résidentiel et du tertiaire. En effet, si l'industrie a su faire des efforts considérables pour diminuer sa consommation énergétique, le secteur du transport voit accroître sa consommation de plus de 100% en trente ans. Les secteurs résidentiel et tertiaire consomment, en 2006, 50% de plus qu'en 1973.

En France<sup>51</sup> : Face à la croissance soutenue de la consommation des autres secteurs de l'économie et en particulier les transports, la part du secteur de l'industrie (hors production d'énergie) n'a cessé de décroître, de 36% en 1973 jusqu'à 23% de la consommation d'énergie finale en 2006 [DGEMP, 2007].

Million de tep	1973	1980	1990	2000	2004	2005	2006
Industrie	47,9	44,7	38,6	39,4	37,9	37,7	37,4
Résidentiel et tertiaire	56,4	54,2	58,5	67,0	69,5	69,8	70,6
Agriculture	3,0	3,2	3,1	3,00	3,00	2,9	2,9
Transports	26,30	32,1	41,7	49,4	50,8	50,4	50,9
<b>Total énergétique</b>	<b>133,6</b>	<b>134,2</b>	<b>141,9</b>	<b>158,8</b>	<b>161,2</b>	<b>160,7</b>	<b>161,7</b>
Non énergétique	10,9	11,8	12,4	17,4	15,4	15,3	15,4
<b>Total</b>	<b>144,6</b>	<b>145,9</b>	<b>154,4</b>	<b>176,2</b>	<b>176,6</b>	<b>176</b>	<b>177,1</b>

Source : DGEMP « Bilan énergétique de l'année 2006 de la France »

**Tableau 3: Consommation d'énergie finale par secteur en France (Corrigée du climat)**

<sup>51</sup> La consommation totale en énergie finale hors secteur non énergétique représente 133,6 Mtep en 1973 soit 21% de moins qu'en 2006.

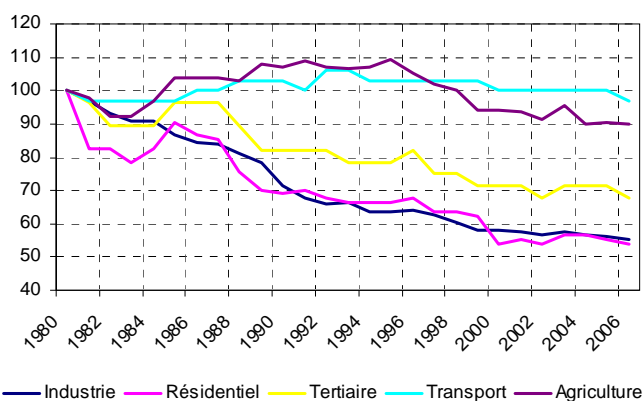
### 3.1.3. L'intensité énergétique comme mesure d'économie d'énergie

L'intensité énergétique<sup>52</sup> représente le rapport entre la consommation énergétique et le produit intérieur brut (PIB). Elle dépend fortement de plusieurs facteurs : progrès technologique, structure économique et modes de vie. L'évolution de cette intensité montre la capacité de l'économie d'un pays à générer des richesses avec plus ou moins d'énergie [DGEMP, 2003].

Afin de faire face à la croissance des consommations, et faire des économies d'énergie sans pour autant affecter le développement économique du pays [David, 2007], les différents secteurs de l'économie ont essentiellement orienté leurs efforts vers l'amélioration de l'efficacité énergétique.

Parmi ces secteurs, le secteur industriel est celui qui a réalisé les économies d'énergie les plus importantes. L'intensité énergétique de l'industrie en Europe (Europe-27) diminue très rapidement depuis 1980<sup>53</sup>, en moyenne de 2,3% par an, soit 45% entre 1980 et 2006. Une partie de cette évolution s'explique par des changements dans la structure de la production industrielle. La croissance de l'activité des branches moins intensives en énergie au détriment des industries fortement consommatrices [Odyssee, 2007] a entraîné mécaniquement une progression plus contenue des consommations d'énergie par rapport à celle de la valeur ajoutée d'ensemble [CPCI, 2007]. L'autre partie reflète les améliorations de l'efficacité énergétique dues aux progrès techniques et aux changements de comportements. Les efforts mis en œuvre par les industriels permettent d'employer plus efficacement l'énergie, par des changements de procédés de fabrication comme par l'apparition de technologies ou d'équipements moins gourmands en énergie.

Bien que la consommation énergétique finale des secteurs résidentiel et tertiaire augmente chaque année, l'intensité énergétique de ces secteurs a baissé en moyenne de 2,6% et 1,6% respectivement entre 1980 et 2006. La situation de l'efficacité énergétique est en revanche beaucoup plus préoccupante pour le secteur de transport. Malgré une légère amélioration depuis 1998, cela reste négligeable par rapport aux efforts réalisés par les autres secteurs de l'économie.

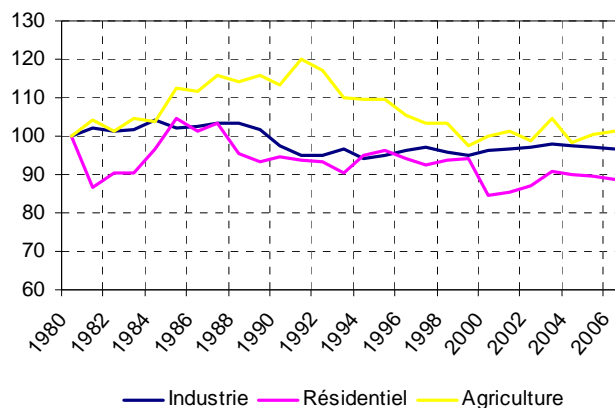


Réalisée à partir d' ENERDATA (GlobalStat 2007)

**Figure 13: Intensité énergétique consommation de combustibles (hors biomasse), indice 100 1980**

<sup>52</sup> L'intensité énergétique est un bon indicateur pour évaluer l'efficacité énergétique globale de l'économie mais elle ne permet pas une évaluation de l'efficacité énergétique d'un point de vue technique [Odyssee, 2007].

<sup>53</sup> Suite aux premier et second choc pétrolier, respectivement 1973 et 1979 et pour répondre à la hausse excessive des prix de l'énergie, les économies d'énergie réalisées étaient beaucoup plus importantes jusqu'à 1985. Ces efforts se sont atténués à partir du contre choc pétrolier de 1986. Le débat est relancé aujourd'hui pour augmenter les efforts des économies d'énergie dans l'industrie.



Réalisée à partir d' ENERDATA (GlobalStat 2007)

**Figure 14: Intensité énergétique consommation d'électricité, indice 100 1980**

En France : L'intensité énergétique globale a diminué de près de 60% entre 1973 et 2005 [DGEMP]<sup>54</sup>. Cette amélioration globale cache de grandes disparités par secteur, avec notamment une stabilité de l'intensité énergétique du secteur du transport.

## 3.2. L'industrie : frontière et périmètre

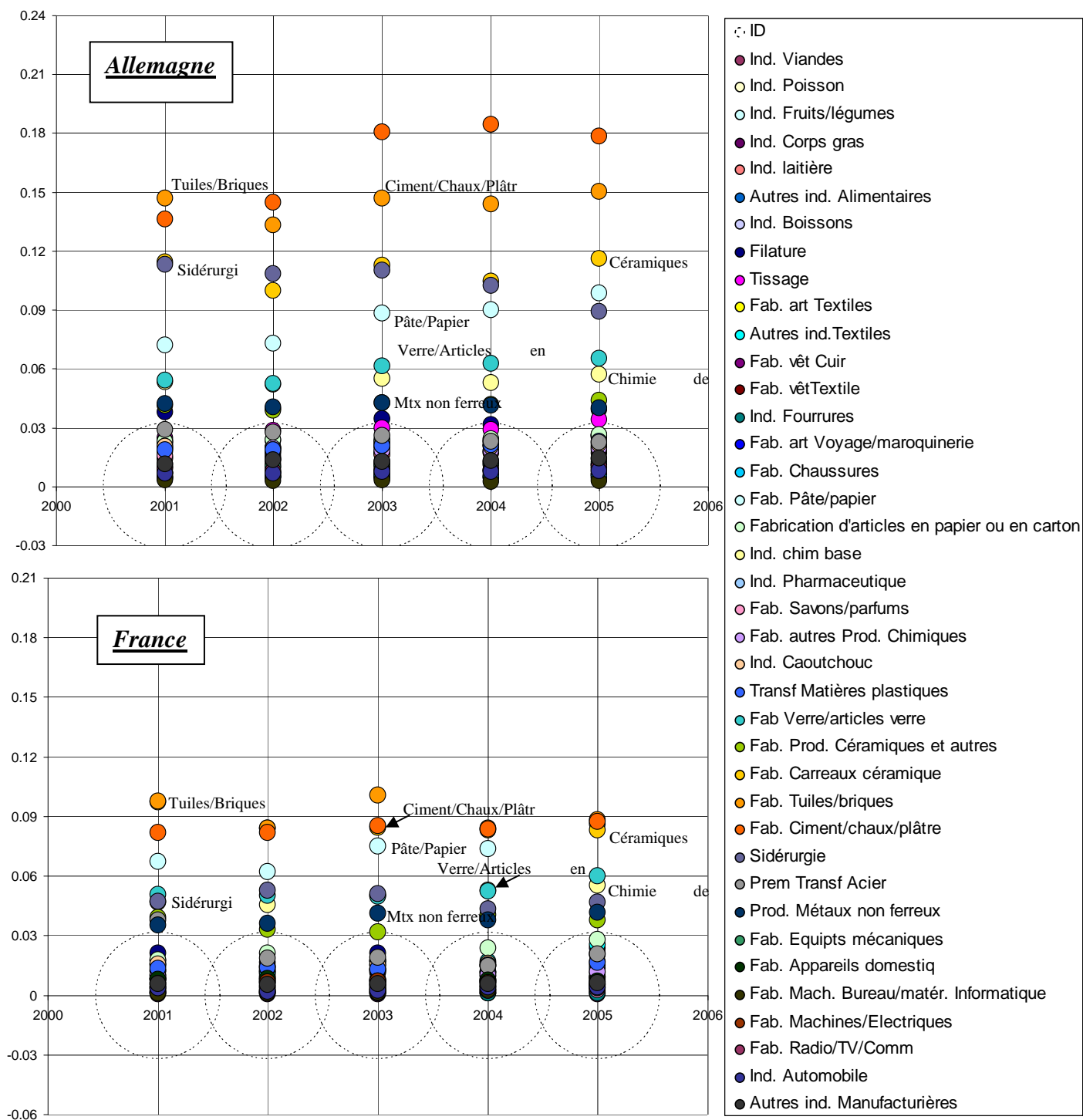
### 3.2.1. IGCE et l'industrie diffuse : définition et frontière

Sous le terme d'industrie sont cachent, d'une manière générique, deux types d'industries à caractères bien distincts, l'industrie diffuse (ID) et l'industrie grand consommatrice d'énergie (IGCE). En effet, l'intérêt de la distinction entre les deux industries n'est imposé que par l'aspect modélisation. Chaque industrie possède des caractéristiques particulières ce qui nécessite une approche de modélisation différente et adaptée aux spécificités de chacune. Par conséquent la séparation entre les deux n'est pas évidente, et le recours à des critères de classification est indispensable pour résoudre la question des frontières.

**La directive du conseil restructurant le cadre communautaire de taxation des produits énergétiques et de l'électricité** [2003/96/CE] définit les IGCE comme étant l'industrie dont les achats de produits énergétiques et d'électricité atteignent au moins 3%<sup>55</sup> de la valeur de la production ou pour laquelle le montant total des taxes énergétiques nationales dues est d'au moins 0,5% de la valeur ajoutée. En se basant sur ce ratio, les figures illustrées ci-dessous (Figure 15) mettent en exergue une première approche sur la séparation entre les IGCE et l'ID. Il faut donc retenir que l'industrie diffuse est celle pour laquelle le paramètre énergie est moins déterminant dans la fonction de coût.

<sup>54</sup> [http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/f1e\\_stats.htm](http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/f1e_stats.htm)

<sup>55</sup> Tel qu'il a été issu du **rapport**, A5-0302/2003 du parlement européen, la définition des IGCE aux coûts de l'énergie équivalent à 3% de la valeur de production semble établi à un niveau assez bas.



Réalisé à partir des données d'EUROSTAT

**Figure 15 : Ratio coûts énergétiques sur la valeur de production pour les différents secteurs de l'industrie manufacturière**

Certains Etats membres de l'union européenne qui appliquent actuellement des régimes nationaux de taxation de l'énergie, définissent l'IGCE en fonction d'autres critères que le rapport coûts de l'énergie sur la valeur de la production et le rapport taxes énergétiques nationales dues sur la valeur ajoutée.

Parmi ces autres critères, **l'étude menée par Martin et al** [Martin, 2007] applique le ratio consommation énergétique sur la valeur ajoutée (intensité énergétique) pour différencier les IGCE des non IGCE. Pour trois pays scandinaves (Danemark, Suède, Norvège), l'étude définit un seuil d'intensité énergétique<sup>56</sup> de 4000 GJ/M€ (1,12 GWh/M€) au dessus du quel l'industrie est considéré comme IGCE. Les résultats de cette étude sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

---

152	Industrie du Poisson	ID
201	Sciage, rabotage, imprégnation du bois	IGCE
202	Fabrication de panneaux de bois	IGCE
204	Fabrication d'emballages en bois	ID
211	Fabrication de pâte à papier, de papier et de carton	IGCE
212	Fabrication d'articles en papier ou en carton	ID
241	Industrie chimique de base	IGCE
261	Fabrication de verre et d'articles en verre	IGCE
265	Fabrication de ciment, chaux et plâtre	IGCE
281	Fabrication d'élément en métal pour la construction	ID
361	Fabrication de meubles	ID

---

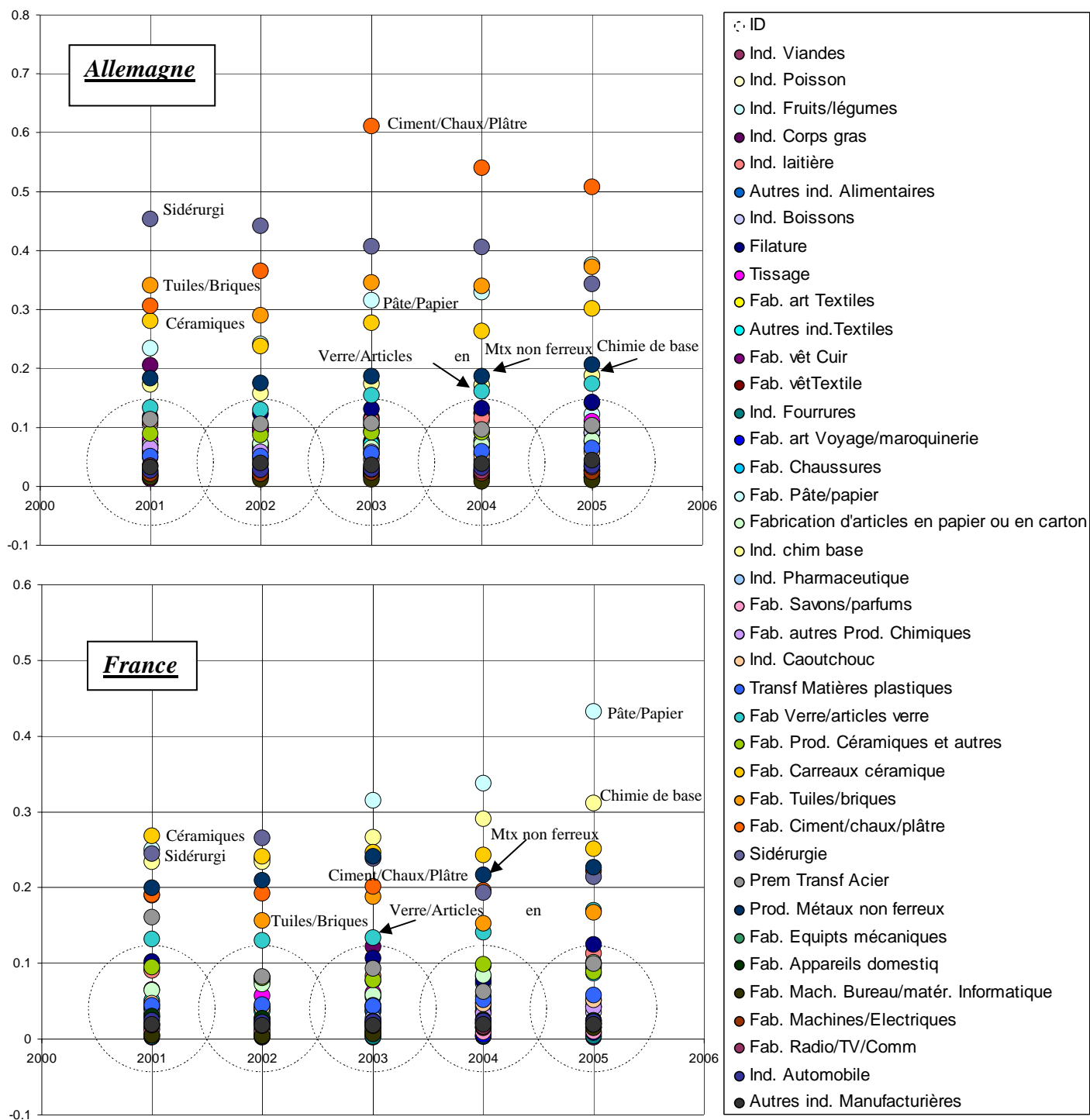
Réalisé à partir de [Martin, 2007]

**Tableau 4: Répartition de l'industrie manufacturière en NACE 3**

En outre, le ratio coût énergétique sur la valeur ajoutée peut être utilisé comme un critère de distinction. La Figure 16 définit l'IGCE comme étant l'industrie dont le ratio est supérieur à 0,1. La lecture de ces données démontre l'importance du coût énergétique dans la valeur ajoutée des IGCE.

---

<sup>56</sup> Dans le cas de certains secteurs ce ratio reste variable entre les pays



Réalisée à partir des données d'EUROSTAT

**Figure 16 : Ratio coûts énergétiques sur la valeur ajoutée pour les différents secteurs de l'industrie manufacturière**

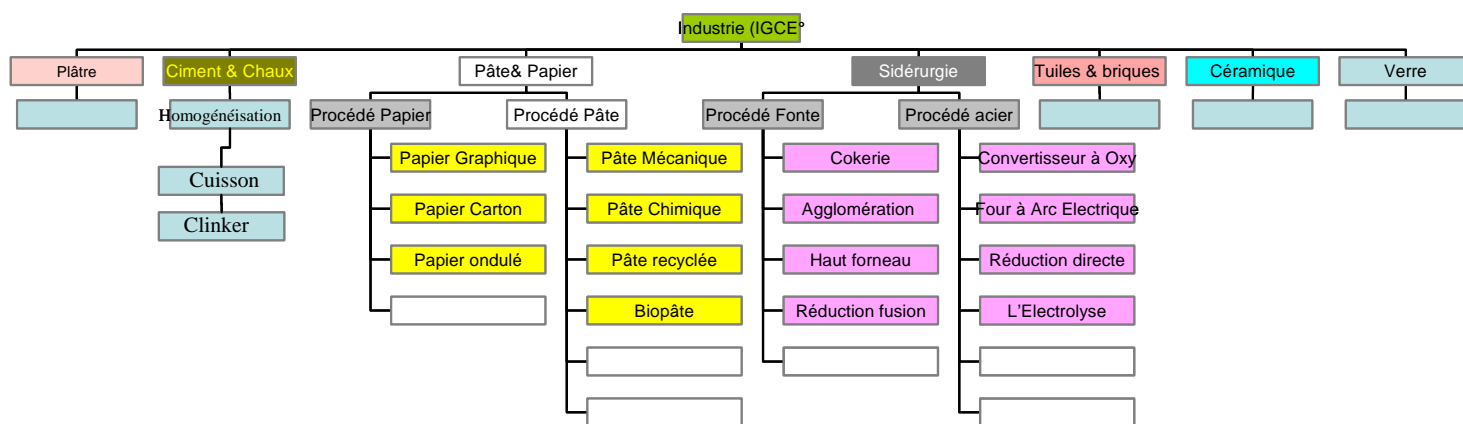
En conclusion, les IGCE sont les secteurs suivant : la sidérurgie, le papier et pâte à papier, le ciment, la chaux, le plâtre, la céramique, les tuiles, les briques, la chimie de base, les matériaux non ferreux...etc.



### 3.2.2. IGCE : périmètre et cadre d'étude

Le périmètre d'étude regroupe l'ensemble des industries grandes consommatrices d'énergie (IGCE) à l'exception du secteur du raffinage et de la chimie. Il couvre les secteurs suivant : la sidérurgie, le papier et la pâte à papier, le verre, le ciment, la chaux, la céramique, les tuiles et les briques (Figure 17).

Le choix de classification des IGCE telles qu'elles sont définies (Figure 16) à l'exception du secteur du raffinage, reprend à l'identique les industries couvertes dans le cadre de la directive européenne des quotas d'émissions de gaz à effet de serre (industries soumises aux quotas d'émissions).



**Figure 17 : Répartition des IGCE dans le cadre du modèle industriel**

Ces industries sont appréhendées en termes physiques, sur la base de la production en Million de tonnes du produit final et de consommation unitaire par tonne (consommation spécifique), par procédé de fabrication.

Chaque industrie est spécifiée par un ensemble d'ateliers qui reprennent à l'identique le processus de fabrication, de la matière première au produit final. Les produits finaux considérés sont : la fonte, l'acier, pâte à papier et papier, clinker, ciment, verre, céramique, tuiles, briques et chaux.

La formalisation générale de l'industrie est schématisée par la figure ci-dessous (Figure 18) : elle représente la structure de base associée à chaque industrie et pour chaque période. Elle permet de quantifier la consommation énergétique finale.

En partant des consommations spécifiques<sup>57</sup>, la production physique établit le besoin énergétique utile. En faisant appel à des achats et à l'auto production, on définit le profil de consommation énergétique du procédé ou du secteur.

<sup>57</sup> Consommation énergétique unitaire rapportée à la tonne du produit.

$$CE_{Proc} = \sum_k CS_k \times Prod_{Proc}$$

$CE_{Proc}$  : Consommation énergétique totale du procédé

$CS_k$  : Consommation spécifique de l'énergie  $k$

$Prod_{Proc}$  : production du procédé

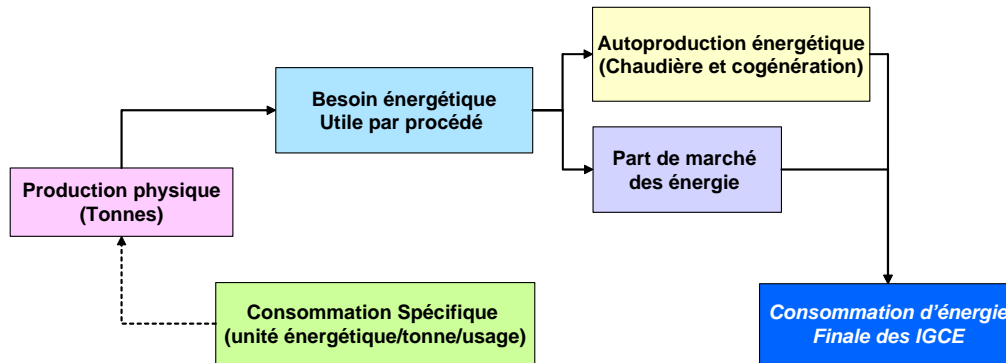


Figure 18 : Schéma de simulation de l'industrie

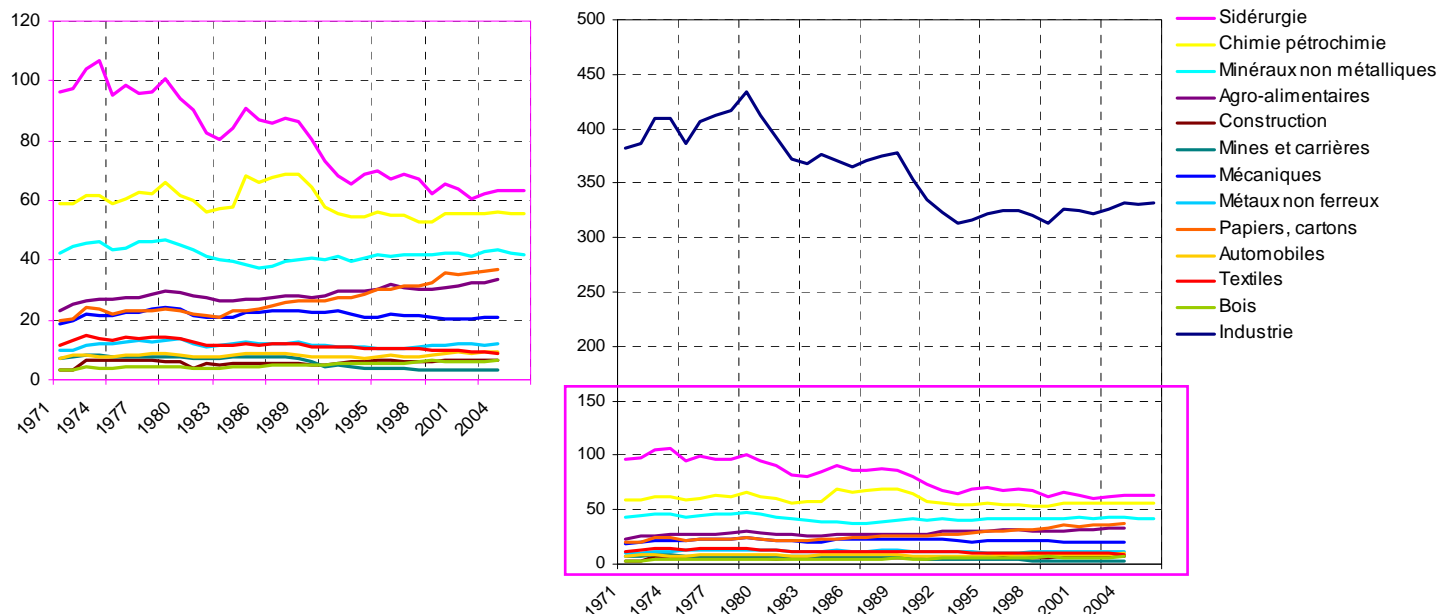
### 3.3. Les problématiques énergétiques et environnementales au cœur des préoccupations de l'industrie

#### 3.3.1. L'énergie dans l'industrie

La consommation finale d'énergie dans l'industrie manufacturière en Europe<sup>58</sup> s'est stabilisée en 2006 à 332 Mtep (3860 TWh) soit le même niveau de consommation de 2005. Dans cette valeur la part des industries grandes consommatrices d'énergie (IGCE)<sup>59</sup> est de 35%. Les secteurs les plus consommateurs sont la sidérurgie, la chimie, les minéraux non métalliques et les papiers et carton, qui représentent respectivement 19%, 17%, 13%, 11% de la consommation d'énergie finale de l'industrie en 2006 (Figure 19).

<sup>58</sup> Europe-27

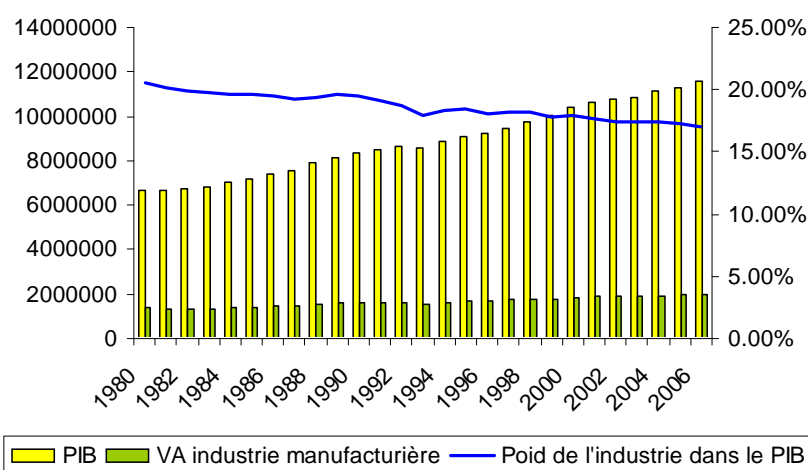
<sup>59</sup> Ciment, Verre, chaux, plâtre, tuiles, briques et chimie de base non compris



Réalisé à partir d' ENERDATA (GlobalStat 2007)

**Figure 19 : Répartition des consommations de l'énergie par secteur dans l'industrie manufacturière en Mtep**

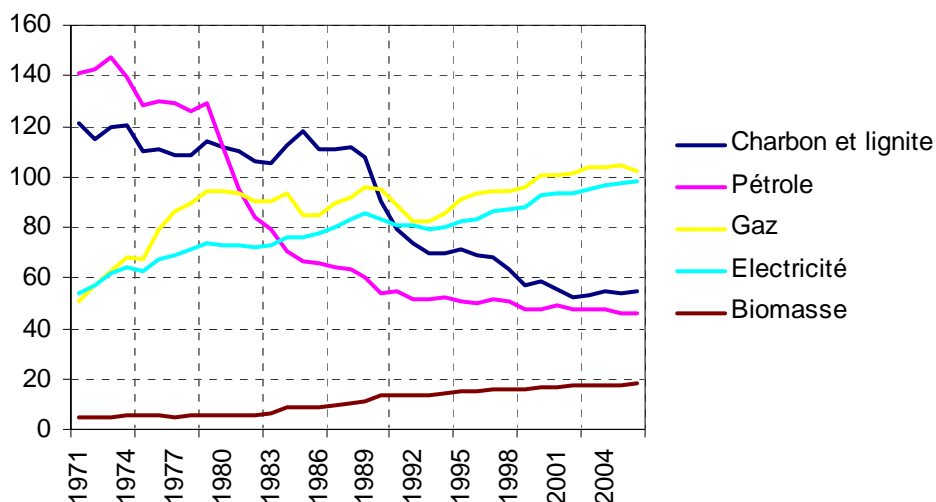
L'industrie représente 20% du PIB en moyenne sur la période 1980-2006. La valeur ajoutée industrielle connaît au cours de la même période une croissance annuelle moyenne de 2%. Cependant cette croissance reste moins rapide que celle de l'ensemble de l'économie, ce qui se traduit donc par une diminution du poids relatif de l'industrie.



Réalisé à partir d' ENERDATA (GlobalStat 2007)

**Figure 20 : Evolution du PIB de la valeur ajoutée industrielle en M\$95**

Les produits pétroliers sont de moins en moins utilisés par les industriels. Alors qu'ils comptaient pour 37 % de la consommation d'énergie finale<sup>60</sup> hors usages matières premières en 1971, ils n'en représentent que 13 % en 2006. Ce repli est très marqué pour tous les secteurs, à l'exception des industries des minéraux non métalliques, où la part des produits pétroliers est la plus importante (24%, juste derrière le gaz naturel mais bien devant l'électricité). Cependant, beaucoup d'établissements qui utilisaient cette énergie pour le chauffage des locaux l'ont remplacée par du gaz naturel.



Réalisé à partir d' ENERDATA (GlobalStat 2007)

**Figure 21 : Répartition des consommations énergétiques par combustible dans l'industrie manufacturière en Mtep**

Les combustibles minéraux solides connaissent une baisse après une certaine stabilité entre 1971 et 1990, avec un peu plus de 16 % des consommations en 2006 (en 1971 les combustibles solides représentent 32% de la consommation totale d'énergie finale). Bien que la part de la vapeur marque un léger repli en 2006, elle représente 4 % des énergies en 2006, contre 3% en 1971. Elle est surtout présente dans les industries du papier et de la pâte à papier. La part du gaz, de l'électricité et de la biomasse évolue progressivement en faveur des combustibles solides et des produits pétroliers pour se situer en 2006 respectivement à 31%, 30% et 6%.

Certains établissements auto-produisent de l'électricité dans les secteurs de la pâte et papier, de la sidérurgie. Elle est en partie revendue et représente, dans ces secteurs, le quart de leur consommation.

En France : En 2006, la consommation brute<sup>61</sup> d'énergie diminue de 2,8% dans l'industrie manufacturière, soit une consommation de 412 TWh (35,4 millions de tep). Dans cette valeur, la part des industries grandes consommatrices d'énergie est de 45% [CPCI, 2007]. Les secteurs les plus consommateurs sont la sidérurgie et les papiers et carton, qui représentent respectivement 23% et 10%, de la consommation d'énergie finale de l'industrie en 2006.

<sup>60</sup> Biomasse comprise

<sup>61</sup> Représente la somme totale de la consommation en combustibles, de la consommation d'électricité y compris l'autoproduction et des achats de vapeur

Secteur en NCE	Total combustibles -1	Achats de vapeur (2)	Achats d'électricité (3)	Autoconsommation d'électricité (4)	Total brut (5=1+2+3+4)	Vapeur vendue (6)	Consom. Pour prod. d'électricité (7)	Total net (5-6-7)
Sidérurgie	6 422	35	1 055	87	7 599	0	3	7 596
Plâtres, produits en plâtre, chaux et ciments	s	s	s	s	s	s	s	s
Production d'autres matériaux de construction et de céramique	1 099	0	292	2	1 393	0	11	1 382
Industrie du verre	1 100	1	291	0	1 392	0	27	1 366
Industrie du papier et du carton	2 502	417	829	173	3 922	13	673	3 237
Ensemble de l'industrie	24 597	1 364	8 957	418	35 336	162	1 528	33 646

S : Secret

Source : SESSI, Scees - enquête annuelle sur les consommations d'énergie dans l'industrie

**Tableau 5 : Consommation totale d'énergie en ktep Selon le secteur (NCE) en 2006**

Le montant des achats d'énergie ne cesse d'augmenter depuis quatre ans : 15% en 2005, 11% en 2006, atteignant ainsi 11,5 milliards d'euros. Depuis dix ans, la part des divers types d'énergies (à l'exception des combustibles solides et des produits pétroliers) évolue progressivement. La part du gaz s'est stabilisée à 38 % (hors usage comme matière première). Il a été rejoint à partir de 2002 par l'électricité, en progression constante, de 33,6 % en 1996 à 38,7 % en 2006.

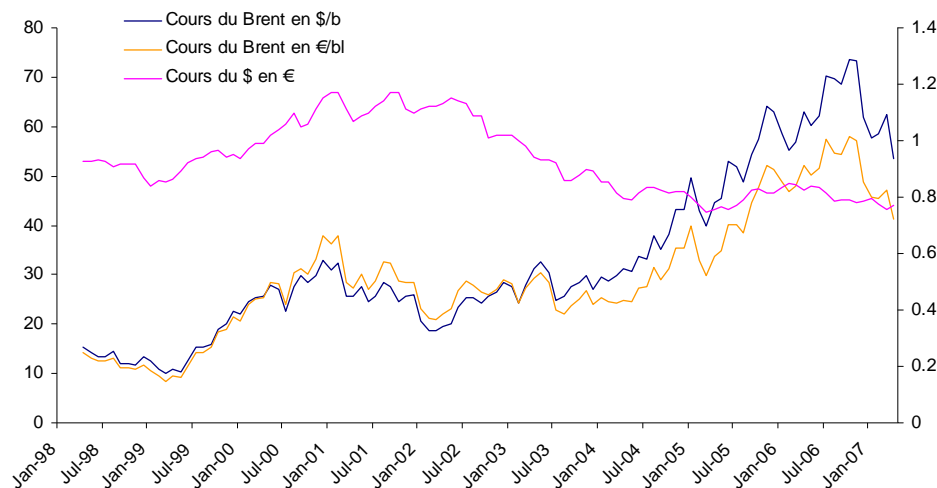
### 3.3.2. La hausse des prix de l'énergie et l'industrie

Depuis une vingtaine d'années, l'industrie manufacturière est confrontée à une hausse continue des prix des énergies fossiles. Face à cette contrainte, l'industrie grosse consommatrice en énergie est particulièrement exposée<sup>62</sup>. En effet certains secteurs IGCE consomment des produits énergétiques non seulement pour satisfaire leurs besoins en énergie, mais aussi comme matière première<sup>63</sup> (ex : l'usage du charbon pour la production du Coke dans la sidérurgie). Donc, l'énergie est très présente dans les IGCE et l'effet d'une hausse de prix est perçu directement dans leur coût de production<sup>64</sup>.

<sup>62</sup> Les augmentations des prix de la production dans l'industrie ne peuvent s'expliquer par le seul impact direct des hausses des prix des énergies fossiles, en effet les hausses du coût de l'énergie provoquent des augmentations de prix sur les autres biens et services consommés par l'industrie.

<sup>63</sup> Même en excluant les produits énergétiques utilisés comme matière première, ces secteurs restent parmi les plus gros consommateurs d'énergie.

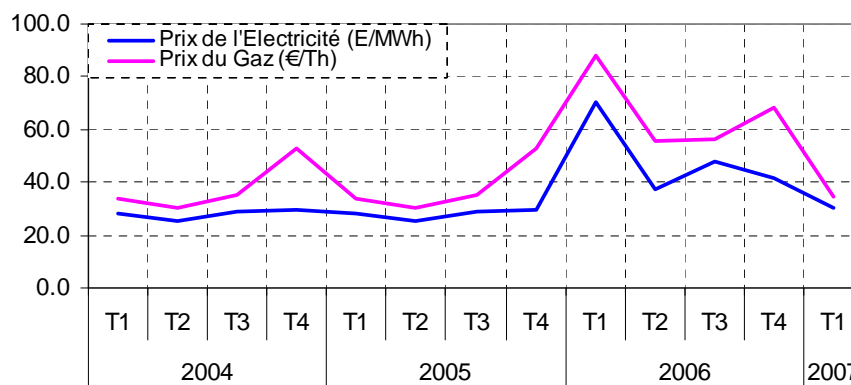
<sup>64</sup> La réalisation des gains important en termes d'efficacité énergétique, n'est répercutée que partiellement l'effet de cette hausse.



Réalisée à partir des bases statistiques de l'INSEE

**Figure 22 : Evolution du cours de Brent depuis 1998 (cours mensuel moyen)**

Les consommations énergétiques de l'industrie comprennent majoritairement les énergies fossiles. Hormis le coke de houille et le charbon, les prix de tous les types d'énergies ont fortement augmentés. Les prix pétroliers entraînant ceux du gaz naturel (l'effet de l'indexation de prix du gaz à celui du pétrole) ont été tirés à la hausse à partir de 2003 (30\$/bl) pour être négociés ces jours ci (mars 2008) à plus de 100\$/bl<sup>65</sup>. Ces hausses ont été tempérées par la baisse du cours du dollar par rapport à l'euro (mars 2008 1€ = 1,55 \$<sup>66</sup>). Les prix de l'électricité impriment la hausse et la volatilité des prix des énergies fossiles depuis 2004.



Réalisé à partir de DGEMP, base de données PEGASE pour le gaz ; Commission de régulation de l'énergie (CRE) pour l'électricité (prix spot en base coté sur le marché Powernext)

**Figure 23: Evolution des prix de gros du gaz et de l'électricité sur le marché "spot"**

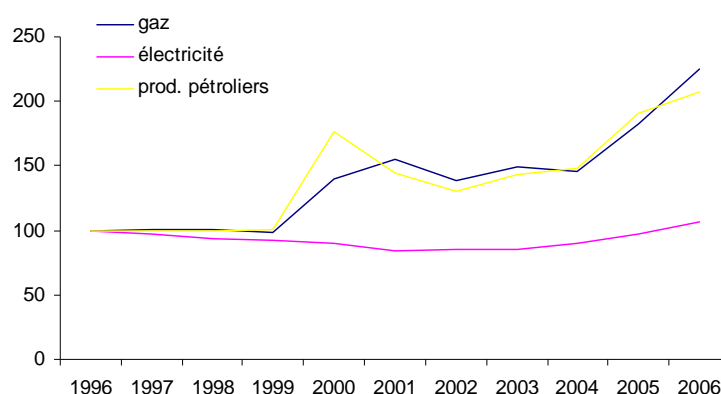
<sup>65</sup> [http://www.industrie.gouv.fr/energie/petrole/textes/se\\_brent.htm](http://www.industrie.gouv.fr/energie/petrole/textes/se_brent.htm)

<sup>66</sup> [http://www.industrie.gouv.fr/energie/petrole/textes/se\\_dollar2.htm](http://www.industrie.gouv.fr/energie/petrole/textes/se_dollar2.htm)

Suite à ces fortes hausses, les industriels ont développé des stratégies variées : hausse des prix de vente ou baisse des marges à court terme, évolution de la gamme des produits offerts vers des produits à faible consommation énergétique, investissement dans des technologies moins consommatrices en énergie ou progrès en matière d'organisation de la production à plus long terme [Sessi, 2007].

#### En France :

**Dégradation de la facture énergétique :** La hausse des prix de pétrole et du gaz entraîne une dégradation de la facture énergétique. Après une stabilisation en 2002 et 2003, la facture énergétique de l'industrie continue d'augmenter rapidement avec la hausse des prix (+50% à partir de 1996) [CPCI, 2007]. Par effet de libéralisation du marché le prix de l'électricité, après avoir baissé de près de 16% entre 1996 et 2001, s'est stabilisé avant de repartir à la hausse à partir de 2003. Pour l'ensemble de l'industrie, le prix moyen s'est établi à 50€/MWh en 2006, contre 39€ en 2003. Le prix du gaz a beaucoup augmenté depuis 1996, avec une pause entre 2000 et 2004. Le gaz naturel se vend en moyenne à 25€/MWh, contre 11€ en 1996.



Réalisé à partir de EACEI de 1996 à 2005, estimations INSEE pour 2006

**Figure 24 : Evolution des prix de gros de l'énergie sur le marché spot (indice base 100 en 1996)**

**L'industrie n'a pas répercuté toute l'augmentation des prix de l'énergie :** Dans l'industrie, les hausses des prix de l'énergie ont un effet direct sur l'augmentation des prix de la production<sup>67</sup>. Ces augmentations ne peuvent cependant s'expliquer que par le seul impact direct<sup>68</sup>. Les hausses des prix de l'énergie provoquent des augmentations de prix sur les autres biens et services consommés par l'industrie. L'impact potentiel total peut être évalué en intégrant aussi ces effets indirects. Ce calcul qui a été mené par l'Insee [Beudaert, 2005] repose sur une hypothèse de diffusion mécanique des augmentations de prix : il suppose que chaque branche répercute intégralement dans ses prix la hausse de ses coûts de production, due uniquement à la hausse des prix de ses consommations intermédiaires. A l'exception des industries des biens intermédiaires, il ressort de cette étude que les industriels n'ont pas répercuté intégralement les fortes hausses de prix de l'énergie dans leur prix de production. De janvier 2004 à septembre 2005, les prix de la production de l'industrie (hors énergie) ne se sont accrus que de 2,3%, alors que l'effet mécanique potentiel était de 2,8 points (Tableau 6).

<sup>67</sup> Un effet plus important sur les industries de biens intermédiaires.

<sup>68</sup> Il s'agit de l'impact primaire de la hausse des prix énergétiques sur le prix de production de la branche. Il ne tient pas compte des effets induits de cette hausse sur les coûts des autres facteurs de production.

	Impact des prix des produits pétroliers		Impact des prix du gaz et du charbon		Impact des prix des produits pétroliers, du gaz et du charbon		Evolution des prix à la production industrielle
	Impact direct	Impact potentiel	Impact direct	Impact potentiel	Impact direct	Impact potentiel	sept. 2005/janv. 2004, en %
<b>Industrie (hors énergie), dont :</b>	0,6	2,1	0,2	0,7	0,8	2,8	2,3
Industrie agricoles et alimentaires	0,2	1,7	0,2	0,5	0,4	2,3	(-0,1)
Industrie des biens de consommation	0,1	1,6	0,0	0,4	0,1	2,0	0,4
Industrie automobile	0,0	1,6	0,0	0,6	0,1	2,2	1,9
industrie des biens d'équipement	0,1	1,1	0,0	0,4	0,1	1,5	1,4
industrie des biens intermédiaires	1,5	3,5	0,5	1,1	2,0	4,6	5,1
dont: chimie organique	11,6	15,5	0,8	1,8	12,4	17,4	24,7
chimie minérale	0,8	2,8	2,2	3,6	3,0	6,3	5,2
métallurgie	0,2	1,2	0,5	1,1	0,8	2,3	10,0

Source : Insee, Observatoire de l'énergie

**Tableau 6: Impacts de la hausse du prix de pétrole, du gaz naturel et du charbon (en point)**

### 3.3.3. La protection de l'environnement dans l'industrie

Durant la première période du système européen d'échange de quotas, les émissions de CO<sub>2</sub> soumises à ce système dépassent les deux milliards de tonnes en 2006 pour l'Europe. Parmi les pays européens les plus émetteurs on compte l'Allemagne, le Royaume-Uni, la Pologne et l'Italie (Tableau 7).

Les pays déficitaires en 2005 le restent en 2006. À l'inverse de l'Espagne qui perd trois points, le déficit s'accroît significativement entre 2005 et 2006 : de 15 à 20% pour le Royaume-Uni et de 4 à 11% pour l'Italie. L'excédent reste en particulier de 4% pour l'Allemagne et 15% pour la France.

	Allocations 2006 (Mt CO <sub>2</sub> )	Emissions 2006 (Mt CO <sub>2</sub> )	Excédent ou déficit en 2006 (%)	Excédent ou déficit en 2005 (%)	Emissions rapportées à la valeur ajoutée** industrielle en 2005 (t/k€)
Allemagne	491,1	471,5	4	4	0,90
Royaume-Uni	205,2	245,5	-20	-15	0,87
Pologne	236,6	208,6	12	15	1,92
Italie	200,0	222,2	-11	-4	0,77
Espagne	154,9	171,1	-10	-13	1,06
France	150,3	127,1	15	13	0,56
Rép. Tchèque	96,8	83,5	14	15	1,54
Pays-Bas	86,2	76,6	11	7	0,92
Grèce	71,1	69,3	2	0	2,20
Belgique	59,9	54,8	9	6	1,02
<b>Ensemble*</b>	<b>2045,7</b>	<b>2002,3</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>0,96</b>

\*UE hors Malte, Roumanie et la Bulgarie.

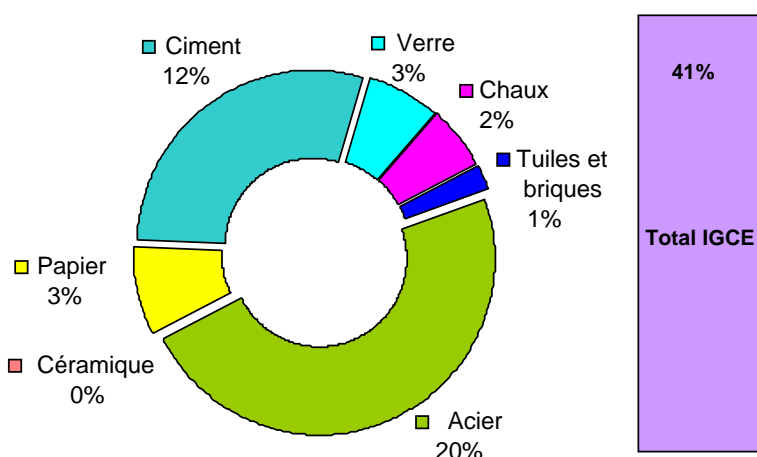
\*\*Dernière année disponible pour la valeur ajoutée

Source : Rapport CPC 2007

**Tableau 7: Bilan 2006 des émissions de CO<sub>2</sub> des installations couvertes par la directive européenne**



En France : L'industrie représente 21% de l'ensemble des émissions de CO<sub>2</sub> en 2005 [CITEPA, 2007]. Les émissions ont été réduites de 5%, soit 6Mt entre 1990 et 2005. Les trois quarts de ces émissions industrielles sont couverts par un système d'échange de quotas européen. Tout dépassement du quota alloué aura pour conséquence une pénalité financière sous forme de taxe ou d'achat de permis d'émission supplémentaires. Les industriels relevant de la directive européenne 2003/87/CE sont donc contraints d'améliorer l'efficacité énergétique de leurs installations ou d'utiliser des énergies générant moins de CO<sub>2</sub>.



Réalisé à partir du PNAQ France

**Figure 25 : Répartition des allocations de CO<sub>2</sub> PNAQ 2008-2012 en France**

Dans l'industrie, les secteurs qui avaient déjà un fort excédent en 2005 ont encore réduit leurs émissions en 2006 : c'est le cas du secteur du papier, dont les émissions baissent de 6 %. Ces baisses sont compensées par des hausses modérées dans la sidérurgie (+ 3 %), le ciment (+ 3 %) et la chaux (+ 4 %). Tous les secteurs ont néanmoins maintenu leurs émissions en dessous de leurs quotas en 2006, sauf le ciment, qui devient déficitaire. Le prix du quota est tombé en dessous d'un euro au printemps 2007, les excédents d'allocation en 2005 et 2006 au niveau Européen sont impossibles à reporter au-delà de 2007.

	Plafond 2008-2012	Plafond 2005-2007	Emissions 2006	PNAQ 1- CO <sub>2</sub> 2006	PNAQ 2- CO <sub>2</sub> 2006
Acier	25,8	28,7	27,6	1,1	-1,8
Papier	4,3	5,3	3,4	1,9	0,9
Ciment	15,6	14,2	14,45	-0,25	1,15
Verre	3,6	4	3,65	0,35	-0,05
Chaux	3,18	3,24	3,1	0,14	0,08
Céramique	0,019	0,02	0,017	0,003	0,002
Tuiles et briques	1,16	1,3	1	0,3	0,16
<b>Total IGCE</b>	<b>131,76</b>	<b>149,95</b>	<b>123,4</b>	<b>26,55</b>	<b>8,36</b>

Réalisé à partir des données de CITL

**Tableau 8: Emissions en 2006 par secteur d'activité en France**

**Dans la première phase (2005 – 2007) de la directive, les IGCE sont moins contraints.** A l'exception du secteur du ciment avec un déficit de 0,25 Mt de CO<sub>2</sub> (Voir Tableau 8), le nombre d'allocations attribuées durant cette période est supérieur aux émissions annuelles dues de l'ensemble des secteurs couverts.

**Le secteur de l'acier est très contraint durant la seconde phase (2008-2012).** Alors que le secteur du ciment se voit attribuer des allocations supplémentaires (+1,4 Mt de CO<sub>2</sub>) par rapport à la première phase, les secteurs de l'acier et du verre sont contraints par un déficit, respectivement de 1,8 et 0,05 Mt de CO<sub>2</sub>.

### 3.3.4. Politique énergétique et environnementale comme principal frein à la compétitivité industrielle

L'entrée en vigueur du protocole de Kyoto et la mise en place de la directive européenne des quotas d'émissions de gaz à effet de serre a des impacts potentiels forts sur la compétitivité internationale entre les producteurs européens et leurs concurrents internationaux qui ont des politiques moins strictes envers le climat<sup>69</sup> [Harro, 2006] (voir aussi section 2.2.3.2).

Les industries grandes consommatrices d'énergie (IGCE), en particulier, sont les plus concernées par l'évolution de cet environnement politique [Pocklington, 2002]. Parmi les IGCE, le secteur de l'acier est le secteur le plus exposé à la compétitivité internationale, du fait de son intensité en carbone et de sa forte ouverture au commerce international [Quirion, 2004 ; Demailly, 2007].

L'effet de cette compétitivité résulte de deux problématiques majeures auxquelles ces industries sont confrontées :

**La pression concurrentielle croissante et leur passé historique en terme d'efficacité en carbone et en énergie.** Les industries couvertes par la directive européenne ont réalisé des efforts considérables en consommations énergétiques et émissions de gaz à effet de serre, ce qui relève actuellement d'un coût marginal de réduction d'une unité supplémentaire très élevé. Donc ces industries craignent de supporter cette contrainte sans pouvoir répercuter une partie ou la totalité de ce coût dans leur prix de vente<sup>70</sup> [Harro, 2006 ; Egenhofer, 2005 ; Reinaud, 2005].

**La hausse des prix de l'électricité en Europe.** L'effet de la contrainte environnementale pourra induire la hausse des prix de l'électricité sur le marché européen, ce qui implique la hausse des coûts de production des industries grandes consommatrices d'énergie. [Sijm, 2005].

Ce panorama signifie que les industries dans les pays non Européens, qui ne sont pas sujets à des restrictions semblables, ne devront pas supporter ces coûts additionnels [Harro, 2006].

Par effet de ces contraintes en Europe, certains industriels ont procédé à la délocalisation ou la fermeture de sites, et d'autres tirent déjà la sonnette d'alarme. Voici exposés les derniers cas les plus probants relevant de cette situation :

<sup>69</sup> Pays non concernés ni par le protocole de Kyoto ni par la directive européenne (Pays émergents)

<sup>70</sup> Par effet de la pression concurrentielle croissante, les industriels ne peuvent pas augmenter facilement leur prix de vente sur le marché international. Cela pourra impliquer des pertes de part de marché.

En 2006, **l'industrie sidérurgique allemande** demande l'arrêt du système européen des quotas. Elle considère qu'elle est plus contrainte en termes de quotas par rapport à d'autres pays de taille équivalente, ce qui finit par exercer une pression énorme sur sa compétitivité.

**Le groupe ArcelorMittal** annonce la fermeture en 2009 de son site d'aciérie électrique et du train à billettes de son site de Gandrange en France. Cet arrêt entraînerait 600 suppressions de postes sur les 1000 que compte le site. Le groupe annonce par ailleurs le maintien de l'activité du haut fourneau du site de Florange, initialement prévu à fermeture en 2012, sous réserve de l'obtention des certificats d'émission.

A Liège **le groupe ArcelorMittal** a décidé de redémarrer le haut-fourneau de son site de Seraing, arrêté depuis 2005, à condition de recevoir des allocations de CO<sub>2</sub> supplémentaires. Le site comporte 2700 emplois directs.

**La filiale du groupe International Paper**, ferme son site de Maresquel en 2006. Cette cessation d'activité a entraîné le licenciement de 230 employés. L'usine possédait une capacité de production de 100 000 tonnes.

**Le groupe papetier Matussière et Forest**, ferme son site de Rambervilliers et près de 200 emplois ont été supprimés. Au total 350 des 1800 salariés ont été supprimés. Le groupe souffrait d'un endettement très important et de la forte hausse des prix des matières premières sans que les prix de vente de la production évoluent.

**Les papeteries de Cran-Gevrier**, employant une centaine de salariés, arrêtent leur production. Fortement pénalisée par l'augmentation des coûts de l'énergie et des matières premières, la fabrication avait été placée en redressement judiciaire à la fin 2005.

**La papeterie Smurfit-Kappa** (papier recyclé) a fermé quatre (Vernon, Bigny, Aubazines et Uzerche) de ses neuf usines en France, 174 postes ont été supprimés.

**La verrerie Saint Gobain Abrasifs** a fermé son site de la Courneuve, 117 emplois ont été supprimés.

**La verrerie Sediver** ferme le site de Saint-Yorre et délocalise sa production. Le site employait 286 salariés.

### 3.3.5. Le cadre énergétique et environnemental et l'intérêt de la modélisation prospective

Les IGCE sont concernées directement par la directive 2003/87/CE. Elles sont reconnues pour leurs consommations énergétiques et émissions de gaz à effet de serre très élevées. De par leur passé, ces industries ont contribué massivement à la réduction des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre, mais ces efforts restent très maigres aujourd'hui.

Le panorama qui vient d'être dressé, pose les premiers jalons quant à une réflexion sur le rôle des industries grandes consommatrices d'énergie dans les politiques énergétiques et environnementales de l'Union Européenne.

Cela nous amène à nous poser quelques questions fondamentales :

- **Comment et par quel moyen, l'industrie (IGCE) pourra-t-elle contribuer à la réduction des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre supplémentaires pour honorer les engagements pris par l'UE ?**
- **De combien pourra-t-elle contribuer à la réalisation de ces engagements ?**
- **A quel degré cette industrie sera atteinte par ces engagements quant à sa compétitivité à l'international ?**

La réponse à ces questions ne peut être envisagée que dans une dimension de long terme. Appréhender le futur dans un environnement en forte interaction est une action très complexe. Faire appel à des outils d'aide à la décision devient une nécessité incontournable.

Le recours à la modélisation prospective dans l'industrie permet de tracer une image dynamique des systèmes énergétiques dans un équilibre entre offre et demande en fonction d'hypothèses exogènes sur le progrès technique, les trajectoires de croissance économique et les politiques publiques.

La modélisation prospective n'a pas pour vocation de fournir des résultats sûrs du futur, ce n'est en aucun cas de la prévision. En cela, elle ne permet que d'anticiper un cadre d'évolution probable à partir des scénarios prévisibles, et d'établir l'influence de la réaction des IGCE.

## 4. Bibliographie

[IP/07/1612]

Commission Européenne, Échange de quotas d'émission: la Commission approuve les plans nationaux d'allocation de la Roumanie pour l'année 2007 et pour la période 2008-2012, Bruxelles, 2007.

[2003/96/CE]

Directive 2003/96/CE du Conseil du 27 octobre 2003 restructurant le cadre communautaire de taxation des produits énergétiques et de l'électricité, 2003.

[Aubert et al., 2005]

Aubert P., et al., Délocalisations et réductions d'effectifs dans l'industrie française, 2005.

[Arthuis, 2005]

Arthuis, J., La globalisation de l'économie et les délocalisations d'activité et d'emplois, Rapport d'information 416, Sénat, 2005.

[Barker et al., 2007]

Barker T. et al., Macroeconomic effects of efficiency policies for energy-intensive industries: The case of the UK Climate Change Agreements, 2000–2010, Energy Economics, 2007.

**[Beudaert, 2005]**

Beudaert M., Pollina L., Hausse des prix de l'énergie importée : des conséquences modérées sur les prix industriels, N° 1051, Insee, 2005.

**[Beudaert, 2007]**

Beudaert M., L'énergie en 2006 : nouvelles hausse des prix, recul de la consommation, N° 1152, Insee, 2007.

**[Chaykowski, 1998]**

Chaykowski R., Giles A., La mondialisation, le travail et les relations industrielles, Relations industrielles, VOL 53, N°1, 1998.

**[Chevalier, 2008]**

Chevalier J-M., Percebois J., Gaz et électricité : un défi pour l'Europe et pour la France, La Documentation française, 2008.

**[COM(2005) 265]**

Livre vert sur l'efficacité énergétique ou comment consommer mieux et moins, Commission des Communautés Européennes, Bruxelles, 2007.

**[COM(2006) 105]**

Livre Vert, Une stratégie européenne pour une énergie sûre, compétitive et durable, Commission des Communautés Européennes, Bruxelles, 2006.

**[COM(2006) 545]**

Commission des communautés Européennes, Communication de la Commission, Plan d'action pour l'efficacité énergétique: réaliser le potentiel, Bruxelles, 2006.

**[COM(2006) 545]**

Communication de la Commission, Plan d'action pour l'efficacité énergétique: réaliser le potentiel, Commission des Communautés Européennes, Bruxelles, 2007.

**[COM(2006) 676]**

Communication de la Commission au Conseil, au Parlement Européen, au Comité Économique et Social Européen et au Comité des Régions, Création d'un marché mondial du carbone - rapport en vertu de l'article 30 de la directive 2003/87/CE, Bruxelles, 2006.

**[COM(2006) 848]**

Communication de la Commission au Conseil Européen et au Parlement Européen, Feuille de route pour les sources d'énergie renouvelables au 21e siècle: construire un avenir plus durable, Commission des Communautés Européennes, Bruxelles, 2007.

**[COM(2007) 1]**

Communication de la Commission au Conseil Européen et au Parlement Européen, Une politique énergétique pour l'Europe, Commission des Communautés Européennes, Bruxelles, 2007.

**[COM(2007) 2]**

Communication de la Commission au Conseil, au Parlement Européen, au Comité Économique et Social Européen et au Comité des Régions, Limiter le réchauffement de la planète à 2 degrés Celsius, Route à suivre à l'horizon 2020 et au-delà, Bruxelles, 2007.

**[COM(2008) 16]**

Commission des communautés Européennes, Proposition de Directive du Parlement Européen et du Conseil, modifiant la directive 2003/87/CE afin d'améliorer et d'étendre le système communautaire d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre, Bruxelles, 2008.

**[CONCL 7224/1/07, 2007]**

Les conclusions de la présidence du Conseil européen de Bruxelles, Conseil Européen, Bruxelles, 2007.

**[CPCI, 2007]**

Commission Permanente de Concertation pour l'Industrie (CPCI), L'industrie française en 2006/2007, Rapport 2007.

**[CPM, 2006]**

Centre du Patrimoine Mondial, Prévisions et gestions des effets du changement climatique sur le patrimoine mondiale, Rapport commun du Centre du patrimoine mondial, des Organisations consultatives et d'un large groupe d'experts à la 30e session du Comité du patrimoine mondial, Vilnius, 2006.

**[David, 2007]**

David O., Fabre A., Les économie d'énergie dans l'habitat existant une opportunité si difficile à saisir, presses de l'Ecole des Mines, Libres Opinion, 2007

**[De Beer et al., 2001]**

De Beer J., et al., Economic Evaluation of Sectoral Emission Reduction Objectives for Climate Change Economic, Evaluation of Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Emission Reductions in Industry in the EU, Bottom-up Analysis, AEA Technology Environment, UK, 2001.

**[DGEMP, 2003]**

Direction Générale des Energies et des Matières Premières, L'évolution de l'intensité énergétique et des économies d'énergie en France entre 1973 et 2001, 2003.

**[DGEMP, 2007]**

Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières (DGEMP), Observatoire de l'Énergie, Bilan énergétique de l'année 2006 de la France, 2007.

**[Directive 2003/87/CE]**

Directive du 13 octobre 2003, établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté et modifiant la directive 96/61/CE du Conseil, Journal officiel de l'Union européenne, 2003.

**[DIRECTIVE 2004/101/CE]**

Directive 2004/101/CE du Parlement Européen et du Conseil du 27 octobre 2004 modifiant la directive 2003/87/CE établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté, au titre des mécanismes de projet du protocole de Kyoto.

**[Directive 2006/32/CE]**

Directive du 05 avril 2006, relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques et abrogeant la directive 93/76/CEE du Conseil, Journal officiel de l'Union européenne, 2006.

**[Dornau, 2005]**

Dornau R., The Emissions Trading Scheme of the European Union, Oxford university press, Oxford, 2005.

**[EEA report, 2007]**

Greenhouse gas emission trends and projections in Europe, Tracking progress towards Kyoto targets, European Environment Agency, 2007.

**[Egenhofer, 2007]**

Egenhofer C., The making of the EU Emissions Trading Scheme : Status, Prospects and implications for business, European Management Journal Vol. 25, N° 6, PP. 453-463, 2007.

**[Egenhofer, 2005]**

Egenhofer C., et al., Business Consequences of the EU Emissions Trading Scheme. Centre for European Policy Studies, Brussels, 2005.

**[El Mouhoub, 2008]**

El Mouhoub B., Mondialisation et délocalisation des entreprises, la découverte, 2008.

**[El Mouhoub, 2008]**

Mouhoub M., Mondialisation et délocalisation des entreprises, La découverte, 2008.

**[Ellerman et al., 2007]**

Ellerman A. D., Buchner B. K., The European Union Emissions Trading Scheme: Origins, Allocation, and Early Results, Environment Economic and Policy, 2007; 1: 66-87.

**[Ferrandéry, 1996]**

Ferrandéry J L., Le point sur la mondialisation, PUF, Paris, 1996

**[GEO-3, 2002]**

Global Environmental Outlook 3, United Nations Environment Programme, 2002.

**[GEO-4, 2007]**

Global Environmental Outlook 4, United Nations Environment Programme, 2007.

**[GIEC, 2007]**

Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC), Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007: Synthesis Report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007.

**[Gielen, 2007]**

Gielen D., Taylor M., Modelling industrial energy use: The IEAs Energy Technology Perspectives, Energy Economics, 2007.

**[GRACES, 2006]**

Groupe de Réflexion Académies et Conseil Economique et Social, Partager la connaissance et ouvrir le dialogue : le changement climatique, 2006.

**[Harro, 2006]**

Harro V., Biermann F., European emissions trading and the international competitiveness of energy-intensive industries: a legal and political evaluation of possible supporting measures, Energy Policy, 2006.

**[IP/07/1617]**

Commission Européenne, Échange de droits d'émission: la Commission annonce le couplage du système mis en place par l'Union européenne avec ceux de la Norvège, de l'Islande et du Liechtenstein, Bruxelles, 2007.

**[Isaias et al., 2005]**

Isaias J., et al., Portée et effets de la délocalisation d'entreprises, Comité économique et social européen, Bruxelles, 2005.

**[Martin, 2007]**

Martin K., et al., Decoupling of industrial energy consumption and CO2 emissions in energy intensive industries in Scandinavia, Energy economics; 29: 665-692.

**[Neelis et al., 2007]**

Neelis M., et al., Energy efficiency developments in the Dutch energy-intensive manufacturing industry, 1980–2003, Energy Policy, 2007.

**[Norbet et al., 2004]**

Norbet A., et al., CO2-Emission Trading and Green Markets for Renewable Electricity, RISO National Laboratory, Denmark, 2004.



**[Oberndorfer, 2006]**

Oberndorfer U., et al., The Impacts of the European Emissions Trading Scheme on Competitiveness and Employment in Europe – a Literature Review, A report commissioned by World Wide Fund for Nature (WWF), 2006.

**[Odyssee, 2007]**

Intelligent Energy Europe, Evaluation of Energy Efficiency in the EU: Indicators and Measures, ADEME Editions, Paris, 2007.

**[Percebois, 2007a]**

Percebois J., Dépendance et vulnérabilité : deux façons connexes mais différentes d'aborder les risques énergétiques, Revue de l'ISMEA, 2006.

**[Percebois, 2007b]**

Percebois J., Energy vulnerability: a multi-facet concept, International Journal of Energy Sector Management, 2007.

**[Percebois, 2007c]**

Percebois J., Les perspectives d'approvisionnement de l'Europe en gaz naturel, présentation au séminaire international France - Amérique Latine et Caraïbes, Géopolitique ; sécurité et durabilité : transition vers un nouvel ordre énergétique mondial, Santiago du Chili, 2007.

**[Pocklington, 2002]**

Pocklington D., Européen Emissions Trading : The business perspective, Européen Environmental Law, 2002

**[Protocole de Kyoto, 1998]**

Protocole de Kyoto à la Convention Cadre des nations Unies sur les Changements Climatiques, Nations Unies, 1998.

**[RA-FMI, 2007]**

Fonds Monétaire International, Rapport Annuel, l'économie mondiale au service de tous, 2007.

**[Reinaud, 2005]**

Reinaud J., Industrial competitiveness under the European Union Emissions Trading Scheme, International Energy Agency, Paris, 2005.

**[Rich, 2004]**

Rich D., Climat Change, Carbon Taxes, and International Trade: An Analysis of the Emerging Conflict between the Kyoto Protocol and the WTO, Environmental Economics and Policy 131, Globalization and the Natural Environment, 2004.

**[RP-FMI, 2007]**

Fonds Monétaire International, Etudes économiques et financières, Perspective de l'économie mondiale, Mondialisation et inégalité, 2007.

**[RP-FMI, 2008]**

Fonds Monétaire International, Mise à jour des Perspectives de l'économie mondiale, 2008.

**[Sessi, 2007]**

Ministère de l'Economie des Finances et de l'Emploi, Face à la hausse des prix des énergies fossiles puis de l'électricité, l'industrie manufacturière a amélioré sa performance énergétique, les 04 pages des statistiques industrielles, Sessi, 2007.

**[Sijm, 2005]**

Sijm J., et al., CO2 Prices dynamics: the implications of EU Emissions Trading Scheme on the price of electricity. ECN report ECN-C-05-081, Energy Research Center of the Netherlands, 2005.

**[Simonet, 2007]**

Simonet J., Les cadres et la mondialisation, Les Cahiers Bernard Brunhes, 2007.

**[Uyterlinde, 2007]**

Uyterlinde M.A., et al., A sustainable energy system in 2050: promise or possibility? A vision by ECN and NRG, 2007.

**[Van Asselt et al., 2007]**

Harro Van Asselt, Frank Biermann, European Emission Trading and the international competitiveness of energy intensive industries: a legal and political evaluation of possible supporting measures, Energy Policy 35 (2007), 497-506.

**[Van Asselt, 2006]**

Van Asselt H., Biermann F., European emissions trading and the international competitiveness of energy-intensive industries: a legal and political evaluation of possible supporting measures, Energy Policy 2006.

**[Van Iersel et al., 2006]**

Van Iersel J., Calvet Chambon E., Rapport d'information de la Commission consultative des Mutations industrielles, Une étude sectorielle des délocalisations, Comité économique et social européen, Bruxelles, 2006.



---

## **CHAPITRE II**

### ***LES MODELES DE PROSPECTIVE ENERGETIQUE POUR L'INDUSTRIE***

---

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>63</b>
<b>2. LA FAMILLE DES MODÈLES .....</b>	<b>63</b>
2.1. LES MODÈLES DE TYPE « TOP-DOWN » .....	64
2.2. LES MODÈLES DE TYPE « BOTTOM-UP » .....	65
2.2.1. MARKAL.....	66
2.2.2. TIMES.....	66
<b>3. LE CHOIX D'UN MODÈLE ADAPTÉ À LA MODÉLISATION PROSPECTIVE DE L'INDUSTRIE. ....</b>	<b>68</b>
<b>4. LE MODÈLE TIMES POUR L'INDUSTRIE.....</b>	<b>69</b>
4.1. SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE DE RÉFÉRENCE POUR L'INDUSTRIE (SERI) .....	70
4.1.1. Les produits .....	71
4.1.2. Les procédés (technologies) .....	71
4.1.3. Les paramètres associés .....	72
4.2. UNE BASE TECHNOLOGIQUE RICHE .....	73
4.3. LES ENTRÉES DU MODÈLE.....	73
4.4. LA STRUCTURE MATHÉMATIQUE DU MODÈLE TIMES INDUSTRIE.....	74
4.4.1. Les variables de décision.....	75
4.4.2. Fonction objectif.....	76
4.4.3. Contraintes .....	77
<b>5. CONCLUSION .....</b>	<b>79</b>
<b>6. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>80</b>

### ➤ LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma récapitulatif des deux approches .....	64
Figure 2: Conception de TIMES .....	67
Figure 3 : La répartition périodique de TIMES.....	67
Figure 4 : Système Energétique de Référence (RES) .....	71
Figure 5 : Représentation d'une technologie dans TIMES .....	72
Figure 6 : Architecture des technologies du modèle industrie .....	73

### ➤ LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Les indices dans TIMES .....	75
Tableau 2: les variables de décision dans TMES .....	76
Tableau 3: Tableau récapitulatif sur la structure de coût .....	77

## 1. Introduction

**Les exercices de prospective énergétique** s'appuient sur des modèles d'aide à la décision, basés sur une formulation mathématique des comportements. En intégrant les trois sphères que sont l'économie, l'énergie et l'environnement, ces instruments permettent d'orienter les grands axes stratégiques des décideurs dans un cadre concurrentiel et en forte évolution.

Les modèles d'aide à la décision sont nombreux et différents selon leur usage. Chaque modèle représente des approches et des spécificités transverses pour des applications appropriées. Cependant, **la question du choix d'un modèle adapté pour répondre à des questions précises est parmi les plus délicates.**

Ce chapitre vise :

- dans un premier temps à établir un aperçu sur les modèles de prospective énergétique existants,
- dans un deuxième temps à analyser les forces et les faiblesses de chaque modèle,
- en dernier à définir les critères de choix d'un modèle approprié pour un exercice de prospective énergétique dans l'industrie.

## 2. La famille des modèles

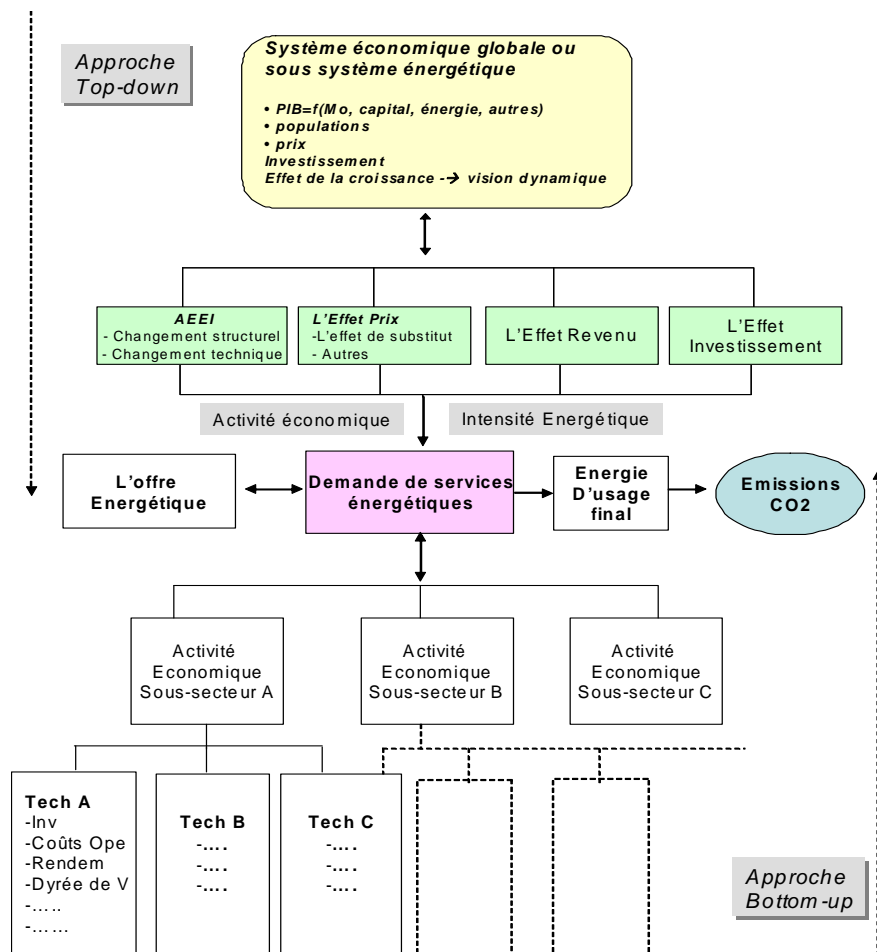
Parmi les études réalisées et les différentes classifications des modèles de prospective énergétique, **Boulanger et al.** « Une analyse comparative des classes des modèles », répartit les classes<sup>1</sup> des modèles en six catégories :

- modèles macro-économétriques,
- modèles multi agents,
- modèles d'équilibre général calculable,
- les réseaux bayésiens,
- modèles d'optimisation centralisée,
- modèles de dynamique des systèmes.

Par leur paradigme, l'ensemble de ces modèles se répartit en trois grandes familles de modèles : « Top-down », « Bottom-up » et « intégrés ». Dans cette partie, l'analyse portera uniquement sur les deux approches **Top-down**, et **Bottom-up**.

---

<sup>1</sup> Ensemble de modèles relevant du même paradigme scientifique



Réalisé à partir de [AIE, 1998]

**Figure 1 : Schéma récapitulatif des deux approches**

Les deux approches ont en commun leur capacité d'analyser l'impact des différentes politiques telles que les coûts de la contrainte du dioxyde de carbone ou l'impact sur les choix technologiques effectués, suite par exemple, aux changements dans le prix des énergies [Berglund et al, 2006]. Les différences principales entre les deux approches seront revues en détail dans les sections qui suivent. La différence essentielle des deux approches réside dans la description technologique détaillée de la représentation du système énergétique pour l'approche Bottom-up, et la description théoriquement cohérente de l'économie générale pour l'approche Top-down [Löschel, 2002].

## 2.1. Les modèles de type « TOP-DOWN »

La notion de « Top-down » renvoie au fait que les informations descendent du niveau le plus agrégé au niveau le plus désagrégé. L'approche « Top-down » cherche à prendre en compte l'ensemble des rétroactions entre l'ensemble des marchés, aussi bien en termes de volumes que de prix [Murphy et al, 2007], sans passer par une information technologique explicite (utilisation des coefficients d'élasticité). Ces modèles sont caractérisés par leur haut niveau d'agrégation et prennent en considération les différents secteurs de l'économie, au sein desquelles des échanges de biens sont possibles [Le Henaff, 2005].

Dans l'approche Top-down, on distingue essentiellement les modèles macro-économétriques et les modèles d'équilibre général calculables.

De Tinbergen en 1937 [Armatte, 2005] (présentant le premier exemple de modèle macro-économique complet) à Deleau et al (1986), les **modèles macro-économétriques** ont connu un essor important comme outils d'aide à la décision. Ils étaient largement utilisés pour guider les politiques économiques des pays développés. Ils sont conçus pour évaluer les impacts macro-sectoriels et budgétaires de politiques de stabilisation ou de stratégies de développement sectorielles. L'horizon de temps de ces modèles se limite à une dizaine d'années, car on considère que les structures économiques se modifient trop pour que les estimations économétriques gardent leur validité. Parmi les modèles macro-économétriques on cite les modèles de type HERMES<sup>2</sup> ou NEMESIS<sup>3</sup> développés en France par l'équipe ERASME<sup>4</sup> [BFP, 2006].

Fondées sur une représentation Walrasienne de l'économie, les **modèles d'équilibre général calculable** (MEGC) traitent du couplage énergie-économie. Ces modèles reproduisent une économie à l'équilibre sur la base d'ajustement par les prix et les quantités sur les facteurs de production. Les modèles d'équilibre général calculable ont la fonction importante *« d'appui aux exercices d'évaluation des coûts complets des politiques de long terme par la cohérence macro-économique qu'ils assurent, via la représentation des relations entre facteurs de production dans chaque secteur, des relations entre secteurs et celles assurant l'équilibre économique général, y compris dans les effets sur le commerce »* [Finon, 2003]. On cite parmi les modèles d'équilibre général calculable, le modèle GEM E3<sup>5</sup> et le modèle GEMINI E3<sup>6</sup>

## 2.2. Les modèles de type « BOTTOM-UP »

A l'encontre des modèles « Top-down », la notion de « Bottom-up » renvoie à l'information ascendante. Mis au point suite au premier choc pétrolier, ces modèles décrivent la cohérence technique d'un système énergétique à partir d'une description technologique plus ou moins détaillée. Un modèle qui décrit une industrie par type de technologie et identifie les matières premières et les combustibles liés à la production unitaire, va permettre, en fonction d'hypothèses exogènes sur la croissance économique et le progrès technique, de tracer une image technique cohérente de l'industrie. Cette image permettra ainsi de déduire les flux d'énergies, des matières premières et des gaz à effet de serre associés.

Les modèles « Bottom-up » assurent une représentation normative du comportement économique et négligent les effets-retour sur l'économie.

Parmi les modèles bottom-up, on distingue les modèles de simulation et les modèles d'optimisation (MARKAL, EFOM, MESSAGE, TIMES...) dont les buts diffèrent mais

<sup>2</sup> Harmonized Economic Research for Modelling Economic Systems  
[http://www.erasme.ecp.fr/index\\_html/recherche/appliquee/view?searchterm=Hermes](http://www.erasme.ecp.fr/index_html/recherche/appliquee/view?searchterm=Hermes)

<sup>3</sup> New Econometric Model for Environmental and Sustainable development and Implementation Strategies  
[http://www.erasme.ecp.fr/index\\_html/recherche/nemesis](http://www.erasme.ecp.fr/index_html/recherche/nemesis)

<sup>4</sup> Equipe de Recherche en Analyse des Systèmes et Modélisation Economique

<sup>5</sup> General Equilibrium Model for Energy-Economy-Environment interactions, Développé dans le cadre de l'opération Joule de l'union européenne mené par plusieurs universités européennes. Principal coordinateur le CES (Centre for Economy studies).

<sup>6</sup> Le modèle a été initié au Commissariat à l'Energie Atomique en 1994, en liaison avec le programme joule de la communauté européenne



peuvent être complémentaires.

### 2.2.1. MARKAL<sup>7</sup>

MARKAL (MARKet ALlocation) est un générateur de modèle développé à l'origine comme outil de prévision et stratégie énergétique pour l'AIE<sup>8</sup>. Sa maintenance et son évolution se font dans le cadre du l'ETSAP<sup>9</sup> (Energy Technology Systems Analysis Program).

MARKAL est un modèle d'optimisation énergétique intégré, qui calcule l'équilibre entre l'offre et la demande de plusieurs formes énergétiques. Le modèle est "tiré" par un scénario de demandes de services énergétiques (demandes utiles), fourni par l'utilisateur sur l'horizon de travail choisi [Loulou et al, 1997].

L'organisation formelle de MARKAL est celle d'un programme mathématique d'optimisation basé sur la programmation linéaire. Les technologies sont regroupées par classe, dont les principales sont : la classe de toutes les sources d'énergie (extraction, importation), la classe des technologies produisant de l'énergie et la classe de l'ensemble des technologies de consommation finale (c'est-à-dire qui fournissent un service énergétique au consommateur).

L'horizon de temps dans MARKAL peut être subdivisé en plusieurs périodes avec des intervalles de temps égaux et fixes (pas de 5 ans). Pour des rythmes de production très variables, seules les technologies de production de chaleur et d'électricité peuvent être subdivisées en sous-périodes (saison, jour).

Plusieurs modifications ont été apportées à MARKAL pour lui permettre d'avoir une plus grande flexibilité : la fonction MACRO<sup>10</sup> associée à MARKAL facilite la prise en compte des interactions entre les instruments du marché et les technologies, ce qui lui confère une approche attribuée aux modèles « Top-down ».

MARKAL MICRO et MARKAL-ELASTIC-DEMAND (MED) sont les étapes les plus fines vers un équilibre partiel, dans laquelle la demande utile est remplacées par des courbes non linéaires.

### 2.2.2. TIMES

TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) développé par l'ETSAP en 1997, part du même paradigme que MARKAL dont la formulation a été entièrement revue, permettant ainsi une nouvelle amélioration et une plus grande flexibilité dans la représentation et la déclaration des paramètres (élasticité de la demande, nature et durée des périodes flexibles,...) [Loulou et al, 2005].

---

<sup>7</sup> Pour plus de détails voir, « documentation of the MARKAL Family Models, R. Loulou G. Goldstein, 2004 », « thèse Edi Assoumou, 2006 », « Prospective énergétique au Québec: Le modèle MARKAL-Québec, R. Loulou et al., 1997 ».

<sup>8</sup> Agence Internationale de l'Énergie

<sup>9</sup> Une entité sous l'égide de l'AIE qui compte 17 pays, cette dernière assure le développement du formalisme et les échanges particuliers de modélisation.

<sup>10</sup> Modèle macroéconomique top-down, développé par le professeur Alan Manne, université de Stanford.

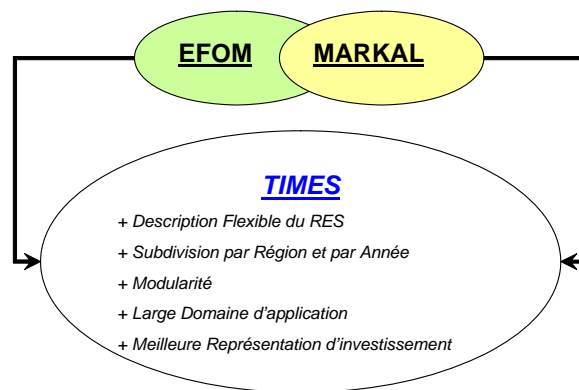
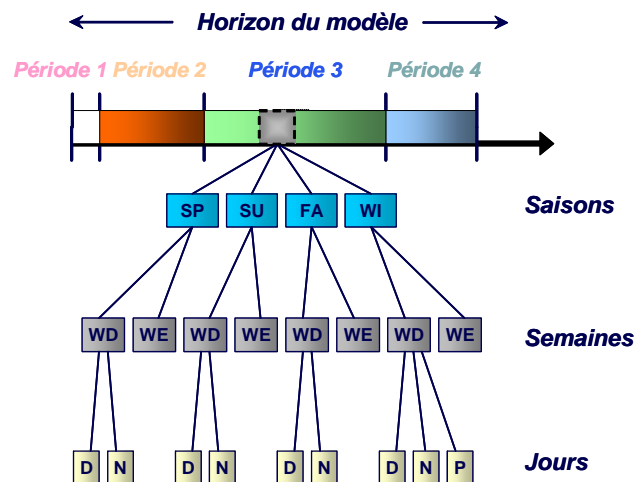


Figure 2: Conception de TIMES

Amélioration et flexibilité reposent sur :

**Des périodes de temps variables :** l'utilisateur est libre de définir les intervalles des périodes de l'horizon de temps.

**Flexibilité des sous périodes :** dans MARKAL uniquement, la production de chaleur et d'électricité peuvent être subdivisées en six sous-périodes QHR(Z)(Y) (Z= Hiver/Été/Intermédiaire, Y= Jour/Nuit). Dans TIMES, tous les produits peuvent être subdivisés en plusieurs sous-périodes.



Source: [Mäkelä., 2005], Helsinki University of Technology.

Figure 3 : La répartition périodique de TIMES

**Découplage de données :** toutes les données d'entrée du modèle sont spécifiées indépendamment des périodes de temps du modèle. Cela donne beaucoup plus de flexibilité quand à la maintenance des données du modèle (on peut changer les intervalles de période sans changer les données d'entrée du modèle), ce qui était beaucoup plus fastidieux dans MARKAL. Par exemple, dans MARKAL, l'utilisateur doit définir le profil de la capacité résiduelle à la période de base, et durant toutes les périodes dans lesquelles cette capacité résiduelle existe. Dans TIMES, la capacité résiduelle est déclarée à la période de base et le modèle se charge de la répartir automatiquement sur l'ensemble des périodes.

**Généralités des procédés :** dans MARKAL, les procédés d'usage final ne possèdent pas de variables d'activité (activité = capacité), et les procédés de ressources ne possèdent pas de variables d'investissement. Dans TIMES, chaque procédé possède les mêmes dispositifs de base.

**Flexibilité des procédés :** dans MARKAL, les procédés sont rigides par définition. Dans TIMES, chaque procédé est totalement flexible. Par exemple, pour définir une chaudière utilisant trois combustibles différents et pour lesquels les rendements dépendent de l'usage de chaque combustible, dans MARKAL, il faut définir quatre procédés, un pour chaque combustible et un dernier pour les coûts d'investissement et les autres paramètres, alors que dans TIMES un seul procédé suffit.

**Autres dispositifs :** ajout d'une représentation complète des phases de construction et démantèlement des procédés, et une description plus précise et plus réaliste des investissements.

Ces modèles sont généralement appliqués à l'analyse du secteur énergétique global mais peuvent aussi être utilisés dans l'étude détaillée d'un secteur unique, comme c'est le cas pour l'industrie.

### 3. Le choix d'un modèle adapté à la modélisation prospective de l'industrie.

Le choix d'un modèle de prospective énergétique est une problématique délicate, car on est facilement désorienté par la multitude de ces modèles et leurs dispositifs très variés quant aux réponses qu'ils peuvent fournir. En effet, il n'existe pas de modèle capable de répondre dans un seul formalisme à toutes les questions de prospective avec une approche cohérente détaillée sur tous les aspects [Assoumou, 2006]. La question qui se pose cependant est : **Quel est le modèle le plus approprié pour un exercice de prospective énergétique dans l'industrie ?**

La réponse à cette question est mise en exergue par un aperçu sur les limites et les forces de chaque modèle :

Les grandes forces des modèles « Top-down » résident dans leur capacité à fournir un cadre global et bouclé, permettant de prendre en compte toutes les interactions entre les décisions des agents économiques, publics et privés [Finon, 2003].

Par conséquent leurs limites sont associées à :

- une description pauvre des techniques de production, d'usage ou de conversion de matières et de l'énergie ;
- une base statistique faible (les modèles Top-down ne nécessitent pas une base statistique considérable) ;
- un calibrage à partir de modèles de projection économétriques différents ;
- une hypothèse de fonctionnement efficace et une information parfaite des marchés.

Les modèles « Bottom-up » sont appréciés pour leur description explicite et détaillée de l'ensemble des technologies associées à un secteur donné. Ils permettent de rendre compte de changements structurels : il est possible de voir apparaître une technologie nouvelle ou d'en voir disparaître une obsolète [Boulanger et al, 2003].

Les limites de ces modèles proviennent de trois causes essentielles<sup>11</sup> :

- D'une part, leur représentation des comportements de minimisation de coût qui suppose une réactivité parfaite aux signaux de prix<sup>12</sup> [Finon, 2004].
- D'autre part, le choix des technologies candidates relève du jugement de l'expert, ce qui peut induire un coté arbitraire ou partial<sup>13</sup> [Boulanger et al, 2003] (c'est aussi le cas dans les modèles top-Down).
- Enfin, les modèles « Bottom-up » supposent une information parfaite sur les paramètres associés aux technologies et ne considèrent pas l'effet rétroactif des choix technologiques sur les autres secteurs ou sur l'économie globalement.

Les questions auxquelles on souhaite répondre dans l'exercice de prospective énergétique pour l'industrie, en particulier les ruptures technologiques, exigent un minimum de détails quant à la description du système énergétique de référence. Une option que les modèles « Top-down » n'assurent pas. En outre, la représentation du secteur industriel d'une manière isolée, ne facilite pas la mise en place d'un cadre global cohérent permettant de prendre en compte toutes les interactions entre les décisions des agents économiques, publics et privés. Ces particularités sont suffisamment discriminatoires et ne nous permettent pas de nous orienter vers les modèles « Top-down ».

Par conséquent, nous optons pour les modèles « Bottom-up ». Parmi ces modèles, un modèle d'optimisation comme le modèle TIMES assure une description technologique détaillée, une forte flexibilité et une représentation plus réaliste et adaptée à un exercice de prospective énergétique pour l'industrie.

Nous allons maintenant voir l'organisation du modèle TIMES appliquée à notre cas.

## 4. Le modèle TIMES pour l'industrie

Nous avons opté pour le modèle TIMES afin de réaliser l'étude prospective du secteur industriel dont voici les principales caractéristiques.

Le modèle représentera uniquement les processus de production du secteur industriel (on entend par processus de production, tous les procédés de fabrication des produits finaux, des produits intermédiaires ainsi que les installations de production d'électricité et de chaleur à l'intérieur des sites industriels).

Le périmètre géographique de l'étude sera l'Europe élargie à 29 pays et l'horizon temporel sera de 50 ans.

Le modèle ne prend pas en compte l'ensemble des secteurs économiques, notamment le résidentiel, le tertiaire et le transport. La production d'électricité issue des parcs de production est considérée comme étant exogène. Par conséquent, l'approche de modélisation reste la

---

<sup>11</sup> On peut ajouter à ces trois limites, la nécessité pour ces modèles d'une base de données importante et détaillée en entrée. Partant du constat que la donnée n'est pas toujours disponible, la recherche de cette dernière constitue l'une des principales contraintes de la modélisation prospective via les modèles « Bottom-up ».

<sup>12</sup> Une technologie avec un coût de production faible est prise au maximum par le modèle.

<sup>13</sup> Si une option technologique n'est pas introduite dans le modèle, elle ne pourra pas être sélectionnée. Le choix technologique de l'expert peut être erroné soit sur les performances, soit sur les coûts. Toute erreur sur ces caractéristiques va biaiser les résultats du modèle.

même que le principe de base, en simplifiant certaines possibilités offertes par la modélisation TIMES concernant la représentation du système électrique et le raffinage du pétrole. Ces aspects sont bien décrits dans la documentation technique de TIMES<sup>14</sup>.

Le modèle généré par TIMES est une représentation du système étudié (le secteur Industriel Gros Consommateur d'Energie en l'occurrence). Il est décrit selon un formalisme qui permettra sa résolution par un code de calcul d'optimisation du commerce (CPLEX dans notre cas).

Il nécessite, en plus de la description technologique du système énergétique, un certain nombre de données exogènes connus a priori sur tout l'horizon de travail. Ces données sont regroupées à travers des scénarios de croissance de la demande finale.

Pour fonctionner, le modèle nécessitera, pour une région donnée et un horizon temporel fixé, les éléments suivants :

- un **système énergétique de référence**, représentant l'architecture de notre système,
- une base de données contenant la **description détaillée des technologies** existantes et futures,
- les entrées du modèle :
  - un scénario de **demandes utiles**,
  - un **scénario des prix des énergies et matières premières**,
  - un scénario de **contraintes environnementales**.

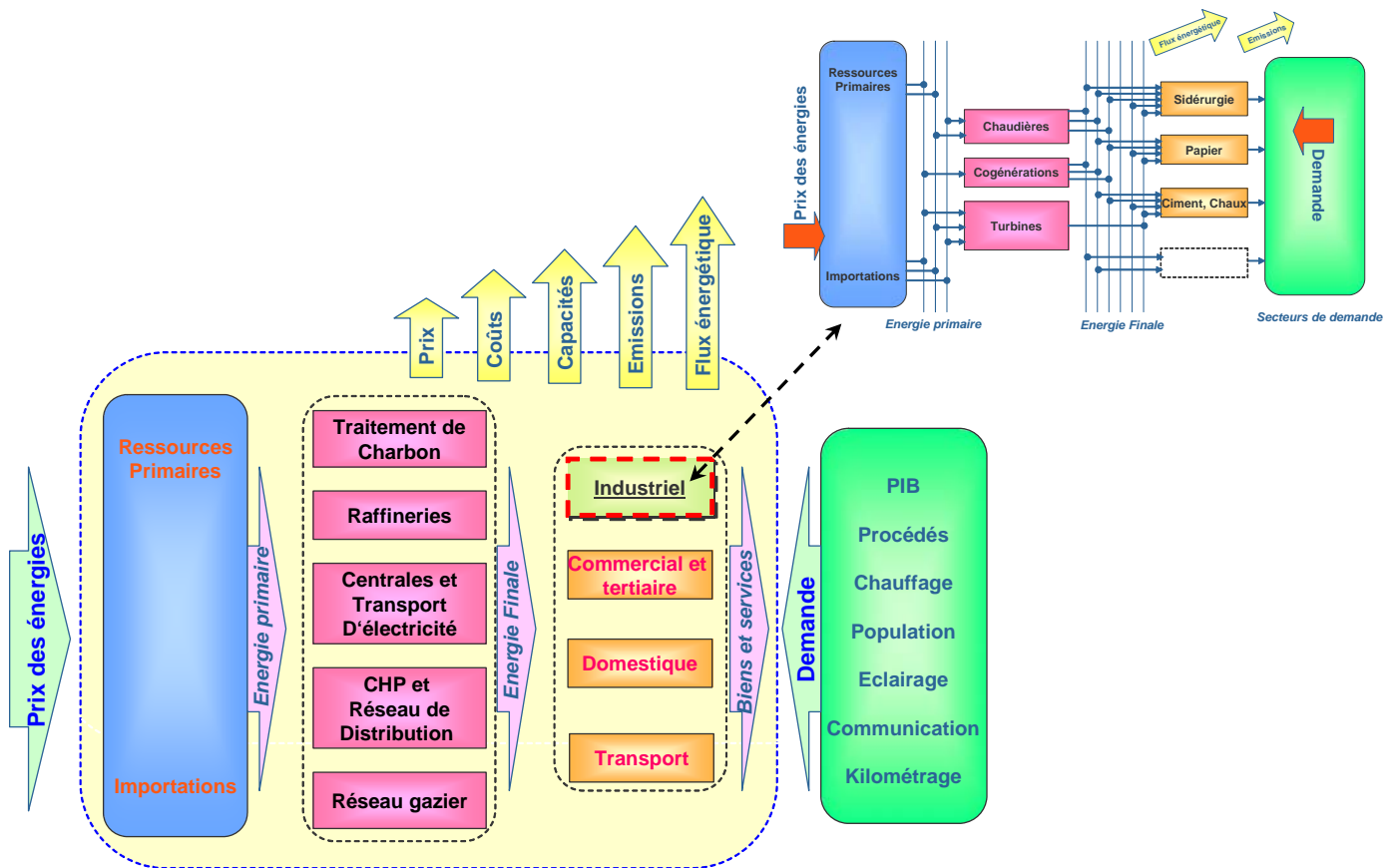
L'ensemble de ces éléments (représentés par des paramètres et variables) forme notre système d'équations définissant le programme **mathématique** du modèle à optimiser. Dans ce qui suit, on détaille ces différents éléments.

#### 4.1. Système énergétique de référence pour l'industrie (SERI)

La structure d'un modèle est fréquemment illustrée par un système énergétique de référence (RES pour Reference Energy System)) qui est une représentation schématique des flux de produits à travers un ensemble de technologies. Il décrit les différentes étapes de transformation, consommation, production pour un service de demande.

---

<sup>14</sup> Documentation for the TIMES Model, R. Loulou 2005.



### Figure 4 : Système Energétique de Référence (RES)

Un système énergétique de référence est défini par deux dimensions essentielles, régionale et sectorielle, qui caractérisent la taille et l'étendu du modèle. Il est structuré selon trois composantes de base, **les produits, les procédés** (ou technologies, dans la suite nous utiliserons indifféremment l'un ou l'autre des termes), et **les paramètres associés**.

#### 4.1.1. Les produits

Ils représentent les énergies primaires, matières premières, les énergies d'usage final et les émissions de gaz à effet de serre.

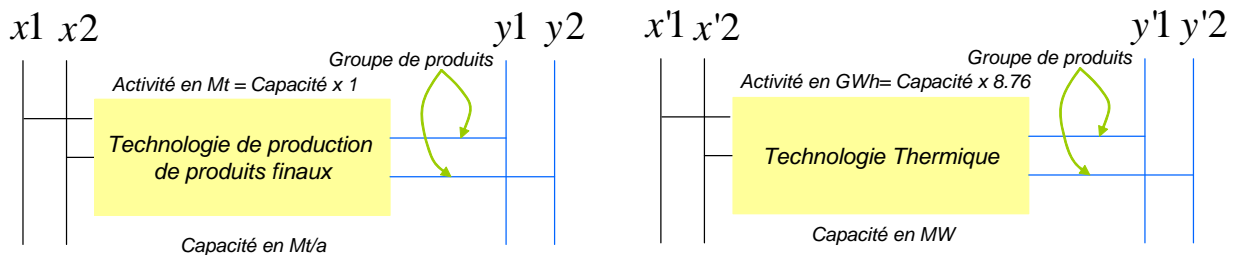
#### 4.1.2. Les procédés (technologies)

Ils ont utilisés pour la transformation des produits (matières premières) sous d'autres formes (produits intermédiaires, semi-finis ou finis), exemple : minerai de fer pour l'acier, le gaz naturel pour le chauffage et/ou l'électricité. Ils concernent généralement l'ensemble des technologies de production d'électricité et de chaleur (turbines, cogénération et chaudières), les technologies de production industrielle,... Ils sont répartis comme suit :

- **PRE** : procédés génériques de production et de transformation d'énergie
- **PRW** : procédés de production de matière
- **ELE** : procédés de production d'électricité
- **HPL** : procédés de production de chaleur

- **CHP** : procédés de cogénération
- **DMD** : procédés de demande
- **IRE** : procédés d'échanges inter-régionaux (import/export)
- **MISC** : procédés divers

Une technologie dans TIMES est représentée par une boîte, elle est caractérisée par : sa catégorie, sa capacité, son rendement, sa disponibilité, le groupe de commodité en entrée et le groupe de commodité en sortie. La figure ci-dessous illustre deux types de représentation d'une technologie.



**Figure 5 : Représentation d'une technologie dans TIMES**

Une technologie peut comprendre un ou plusieurs produits entrants et sortants. Pour certaines technologies les produits sortants sont utilisés comme entrants dans une autre technologie pour satisfaire une autre catégorie de demande (exemple: la pâte à papier issue du bois est utilisée pour produire du papier).

#### 4.1.3. Les paramètres associés

Pour une représentation plus appropriée, dans TIMES, les technologies et les produits sont spécifiés par plusieurs paramètres qui sont classés comme suit :

Les paramètres associés aux technologies : on distingue quatre types de paramètres :

**Les paramètres techniques** : le paramètre technique essentiel d'une technologie est la capacité installée. Pour un régime de fonctionnement<sup>15</sup>, la technologie dépend d'autres paramètres tels : l'efficacité (le rendement), la disponibilité des facteurs de production, la consommation des produits par unité d'activité, la part des énergies par unité d'activité et la durée de vie technique.

**Les paramètres économiques** : ils représentent les coûts d'investissements, les coûts associés au fonctionnement et à la maintenance et le taux d'actualisation général ou spécifique à la technologie.

**Paramètres d'ordre politique** : essentiellement, les taxes, les subventions et les limites sur les émissions des polluants.

**Paramètres spéciaux** : les bornes sur les capacités installés et/ou l'activité (minimale LO, fixe FX, maximale UP).

<sup>15</sup> Le regime de fonctionnement désigne l'activité qui représente la variable de décision du modèle

### Les paramètres associés aux produits :

**Les paramètres techniques :** ils facilitent le contrôle de la part maximale ou minimale associée à chaque produit. Par exemple, une chaudière peut accepter du fioul ou du gaz comme entrée, dans ce cas l'utilisateur peut fixer la part associée à chaque combustible.

**Les paramètres économiques :** ils se limitent généralement aux taxes et aux subventions associées à chaque produit.

En intégrant l'ensemble de ces composantes, le modèle TIMES représente un système énergétique de référence global et multi-régional ou partiel avec une ou plusieurs régions (Figure 4), dont la représentation dépend fortement de la disponibilité de la base de données et son niveau de désagrégation. Plus la base de données est disponible plus la représentation peut être affinée et détaillée<sup>16</sup>.

## 4.2. Une base technologique riche

La base technologique industrielle contient les installations de fabrication ou de conversion de matière, ou d'énergie existantes (état du système étudié à l'instant initial représenté par sa capacité résiduelle à l'instant t) et nouvelles (alternatives) qui seront disponibles tout au long de l'horizon de travail (jusqu'à 2050 dans notre cas).

Chaque technologie y est décrite de façon explicite et détaillée par ses intrants et ses extrants, ses coûts (d'investissement, d'entretien, et de fonctionnement), sa durée de vie, sa date de première disponibilité, et ses émissions de polluants.

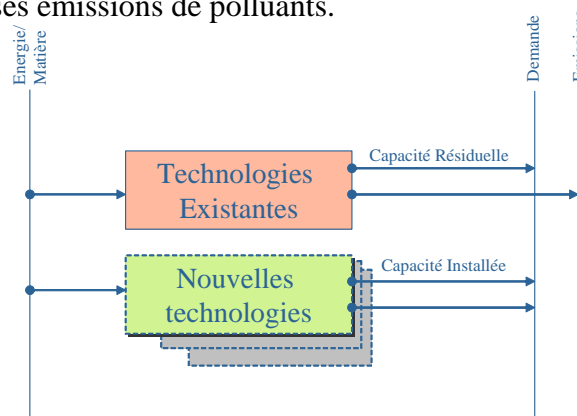


Figure 6 : Architecture des technologies du modèle industrie

## 4.3. Les entrées du modèle

### La demande utile

La demande dans TIMES est caractérisée par un ensemble d'indicateurs externes fournis directement par l'utilisateur (experts en croissance sectorielle) ou par d'autres modèle comme le modèle TIMES construit par EFDA<sup>17</sup> ou le modèle d'équilibre général calculable GEM-E3<sup>18</sup>.

<sup>16</sup> Dans TIMES on définit les technologies par des boîtes et les commodités par des lignes verticales.

<sup>17</sup> EFDA : European Fusion Development Agreement

<sup>18</sup> GEM-E3: General Equilibrium Model For Economy, Energy & Environment



Ces indicateurs sont généralement la population et le PIB, ou une combinaison des deux (PIB par habitant). D'autres indicateurs peuvent être pris en compte par avis d'experts, comme par exemple la croissance de la Chine par rapport à la production d'acier en Europe ou dans le Monde.

Cependant, quand le modèle fonctionne avec des scénarios alternatifs (par exemple une contrainte sur les émissions de CO<sub>2</sub>, des changements de données et/ou caractéristiques des technologies), il est probable que la demande soit affectée. Afin de prendre en considération ces effets, le Modèle TIMES demande d'autres entrées comme les élasticités de la demande à leurs propres prix.

$$\text{Demande} = \text{Indicateurs}^{\text{Elasticité}}$$

### Les prix des énergies et de matières premières

Les scénarios de prix constituent le second élément essentiel dans un exercice de prospective énergétique. Ils sont exogènes au modèle, souvent fournis par d'autres modèles de prospective, particulièrement les modèles « Top-down ». Ces scénarios représentent l'évolution future des prix de toutes les formes d'énergies et de matières premières définies dans le modèle.

### La contrainte environnementale

La contrainte environnementale comprend les scénarios actuels et futurs concernant les coûts supplémentaires sur les émissions de gaz à effet de serre. Cette contrainte peut aussi être physique, comme infliger un plafond sur les émissions de polluants.

## **4.4. La structure mathématique du Modèle TIMES Industrie<sup>19</sup>**

L'ensemble des paramètres et variables présentés dans cette partie concerne uniquement les portées du modèle TIMES pour l'industrie et non les possibilités de TIMES en qualité de générateur de Modèles complet.

L'organisation formelle de TIMES est celle d'un programme mathématique linéaire, composé d'une **fonction-objectif** à minimiser, sous différentes **contraintes**. Les variables endogènes sont habituellement appelées **variables de décision** : elles servent à formaliser les expressions mathématiques exprimant la fonction-objectif et toutes les contraintes. Une fois le problème formulé mathématiquement, il reste à le résoudre par un algorithme approprié à la programmation linéaire (le Simplexe en l'occurrence) pour obtenir les valeurs optimales des variables de décision. L'ensemble de ces valeurs constitue la solution du modèle [Loulou et al. 2004]. Le tableau ci-dessous contient une description informelle des variables, de la fonction-objectif et des contraintes de TIMES.

Nous donnons la signification des indices utilisés dans la formulation mathématique de notre problème.

<sup>19</sup> L'ensemble des paramètres représenté dans cette partie concerne uniquement les portés du modèle TIMES pour l'industrie et non les possibilités de TIMES en qualité de générateur de Modèles complet.

Les indices dans TIMES	
<b>r</b>	Indice régional
<b>t or v</b>	Les périodes : t est la période en cours, v correspond à l'année ou un investissement est additionné.
<b>p</b>	Procédé
<b>c</b>	Commodité (énergie, matériel, émissions, demande...)
<b>s</b>	Sous-période, cet indice est généralement utilisé pour les installations de production d'électricité, de chaleur ainsi que les installations de stockages, qui nécessite un rythme de production journalier ou annuel variable (ce paramètre n'est pas pris en compte dans le cadre du modèle industrie).

Tableau 1: Les indices dans TIMES

#### 4.4.1. Les variables de décision

Voici les notations employées concernant les variables de décision qui seront calculées par notre modèle et qui nous permettront de construire notre analyse.

<b><i>NCAP(r,v,p)</i></b>	Nouvelle capacité additionnelle (investissement) pour une technologie <b>p</b> , pendant la période <b>v</b> et la région <b>r</b> . Le <b>v</b> ( <i>millésime</i> ) correspond à l'année d'investissement.  L'unité de base est le PJ/an pour l'ensemble des technologies énergétiques, million de tonnes par an (Mt/an) pour les technologies de production (sidérurgie, papier, ciment...) et le GW pour les capacités de production des installations énergétiques.
<b><i>CAP (r,v,t,p)</i></b>	Capacité installée de la technologie <b>p</b> , dans la région <b>r</b> et pendant la période <b>t</b> , (optionnel avec v). Cette variable représente la capacité totale en place pendant la période t en considérant la capacité résiduelle ainsi que les capacités d'investissement additionnelles pendant cette période et pour lesquelles la durée de vie n'est pas atteinte.
<b><i>CAPT (r,t,p)</i></b>	Capacité totale installée, elle définit aussi l'ensemble des limites spécifiques à cette capacité d'installation.
<b><i>ACT (r,v,t,p)</i></b>	Niveau d'activité de la technologie <b>p</b> , dans la région <b>r</b> et la période <b>t</b> .
<b><i>FLOW (r,v,t,p,c,s)</i></b>	Quantité de la commodité <b>c</b> consommée ou produite par la technologie <b>p</b> , dans la région <b>r</b> et la période <b>t</b> .

<b>TRADE</b> $(r, v, t, p, c, s, imp)$ <i>et</i> $(r, v, t, p, c, s, exp)$	Quantité de la commodité $c$ exportée ou importée par la technologie $p$ de la région $r$ et durant la période $t$ .
<b>D</b> $(r, t, d)$	Demande de produit à usage final (demande utile).

Tableau 2: les variables de décision dans TMES

#### 4.4.2. Fonction objectif

La fonction objectif est une expression linéaire d'un ensemble de variables que le modèle maximise ou minimise. Dans TIMES, la maximisation du surplus de la fonction objectif est transformée en minimisation du coût global actualisé en prenant le dual du problème.

$$VAR\_OBJ = \sum_{r \in REG} REG\_OBJ_r$$

$$REG\_OBJ(z, r) = \sum DISC(y, z) \times \left\{ INVCOST(y) + INVTAXSUB(y) + FIXCOST(y) \right. \\ \left. + FIXTAXESUB(y) + VARCOST(y) \right\}$$

**INVCOST, INVTAXSUB** : Coûts d'investissement des technologies,

**FIXCOST (CF)** : Coût fixes de fonctionnement et de maintenance,

**VARCOST (CV)**: Coûts variables de fonctionnement et de maintenance,

**FIXTAXESUB**: Taxes et subventions

L'ensemble des coûts dans le cadre du modèle TIMES est représenté en qualité d'unité de coût par unité de capacité.

**La fonction de coût** est représentée par la somme des coûts fixes et des coûts variables.

$$CT = \sum (CFT + CVT)$$

**Les coûts fixes** représentent les coûts qui ne varient pas en fonction de la taille de l'activité. Autrement dit, il s'agit des coûts qui restent constants malgré l'augmentation du volume de production.

$$CFT = CF + AINV \times \frac{i \cdot (1+i)^{DV}}{(1+i)^{DV} - 1}, \quad CFT : \text{Coût fixes total}, AINV : \text{Annuités d'investissement}, i : \text{Taux d'actualisation}, DV : \text{durée de vie de l'installation}$$

Exemples de coûts fixes de fonctionnement et de maintenance (CF) : loyer, téléphone, éclairage, abonnement électrique, taxes municipales, salaires des cadres...etc.

**Les coûts variables** sont ceux qui varient avec le volume de production.

$$CVT = CV + CENG + CMP, \quad CVT : \text{Coût variable total}, CENG : \text{coût de l'énergie}, CMP : \text{Coût de la matière première}$$

Exemples de coûts variables de fonctionnement et de maintenance (CV) : main d'œuvre directe, commissions des vendeurs...etc.

**Remarque :** Il est parfois difficile de dissocier les coûts variables des coûts fixes relatifs au fonctionnement et à la maintenance. Dans le cadre du modèle industrie les coûts fixes et les coûts variables (de fonctionnement et de maintenance) ne sont pas spécifiés par type de coûts. Ils sont représentés par une valeur globale.

**Tableau 3: Tableau récapitulatif sur la structure de coût**

Dans TIMES la fonction objectif est construite avec précision, elle attribue à l'ensemble des flux monétaires une représentation beaucoup plus réaliste, à l'inverse de MARKAL où les investissements sont déclarés en totalité à la première période :

- Les investissements sont répartis en paiements annuels et comptés pour chaque année pendant l'horizon de temps.
- La valeur résiduelle des investissements reste active à la fin de l'horizon de temps (EOH<sup>20</sup>), cette valeur est calculée et assignée à l'année suivant la fin de l'horizon de temps (EOH + 1).
- L'ensemble des coûts annuels listés ci-dessus, qui sont généralement des coûts annuels, sont ajoutés au coût du capital annualisé auquel on soustrait la valeur résiduelle.
- TIMES calcule pour chaque région, la Valeur Actuelle Nette (NPV pour Net Present Value) totale de l'ensemble des coûts annuels ramenés à une seule année de référence. Cette valeur annuelle actualisée est agrégée en un seul coût total, qui constitue la fonction objectif à minimiser.

**NPV** : Valeur Actuelle Nette

**R** : Régions

**$d_{r,y}$**  : taux d'actualisation global

**REFYR** : Année de référence

**YEARS** : l'ensemble des années du modèle

**ANNCOST( $r,y$ )** : le coût total annuel pour la région  $r$  pendant l'année  $y$ .

$$NPV = \sum_{r=1}^R \sum_{y \in YEARS} (1 + d_{r,y})^{REFYR-y} \cdot ANNCOST(r, y)$$

#### 4.4.3. Contraintes

Les contraintes sont l'ensemble des inégalités linéaires entre les variables du système. Elles fixent les bornes et améliorent la représentativité du système à modéliser comme l'épuisement des ressources, les capacités et les niveaux d'activité des installations...

Nous pouvons définir plusieurs catégories de contraintes

<sup>20</sup> La dernière année de l'horizon de temps du modèle.

### Contrainte de Capacité

Investir dans une technologie revient à augmenter sa capacité résiduelle pendant toute la durée de vie qui a été définie. A la fin de la durée de vie de chaque technologie, la capacité totale décroît de la même quantité. La capacité installée d'une technologie que TIMES calcule sur une période est égale à la capacité totale disponible pendant cette période.

Certaines capacités existent avant l'horizon de temps (capacité résiduelle) mais peuvent encore être opérationnelles à la fin de l'horizon et d'autres peuvent être créées tout au long de l'horizon de travail.

La capacité totale disponible pour chaque technologie  $p$  de la région  $r$ , pendant la période  $t$ , est égale à la somme des investissements réalisés avant ou au cours de la période.

$$CAPT = \sum NCAP + RESID$$

*RESID* est la capacité de la technologie due à des investissements réalisés avant la période initiale.

### Contrainte sur les variables d'activité de la technologie.

TIMES fait bien la distinction entre la variable d'activité  $ACT(r,v,t,p,s)$  et la variable des flux de commodités  $FLOW(r,v,t,p,c,s)$ . Pour cela, il est nécessaire d'introduire une contrainte reliant ces deux types de variables en introduisant une égalité.

$$ACT = \sum \frac{FLOW}{ACTFLO}$$

*ACTFLO* est le facteur de conversion (souvent égal à 1) entre l'activité de la technologie et le flux d'une ressource particulière.

### Contrainte d'utilisation de la capacité

Dans chaque période temporelle le modèle peut utiliser une partie, ou la totalité de la capacité installée selon la disponibilité de celle-ci  $AF(r,v,t,p,s)$ . Notons que le modèle peut décider d'utiliser moins que la capacité disponible. Dans certain cas, l'utilisateur peut imposer que certaines technologies soient utilisées à pleine capacité.

Pour chaque technologie  $p$ , pendant la période  $t$  ou  $v$ , dans la région  $r$  et la sous période  $s$ , l'activité ne peut dépasser la capacité disponible spécifiée par son facteur de disponibilité.

$$ACT \leq AF \times CAPUNIT \times CAP$$

*CAPUNIT* est le facteur de conversion entre unité de capacité et l'activité (souvent égal à 1 sauf pour les chaudières et les turbines, dont la capacité est exprimée en GW), *AF* est le facteur de disponibilité.

Exemple : l'activité d'une chaudière à gaz  $ACT \leq 0,9 \times 8,76 \times CAP$ , l'activité d'une machine à papier  $ACT \leq 0,9 \times 1 \times CAP$

*CAPUNIT* = 8,76 est le facteur de conversion entre l'unité de capacité en GW et d'activité en TWh

*CAPUNIT* = 1 est le facteur de conversion entre l'unité de capacité en Mt et d'activité en Mt

### L'équation d'équilibre des ressources

Dans TIMES, l'équilibre des flux des commodités doit être assuré. Pour chaque période et pour chaque région, la somme de chaque ressource  $P$  produite et/ou importée doit s'équilibrer avec la quantité consommée et/ou exportée.

$$\sum \text{Prod}_p + \sum \text{TRADE}(\text{imp})_p \geq \text{ou} = \sum \text{Cons}_p + \sum \text{TRADE}(\text{exp})_p$$

Où :

$\geq$  Pour les flux énergétique et  $=$  pour la matière première et les émissions.

### Relation entre les flux de commodité dans une technologie

Une technologie avec un, ou plusieurs flux de commodités est essentiellement définie par une, ou plusieurs variables indépendantes de flux entrants et sortants. En l'absence d'une relation entre ces flux de commodités, la technologie serait entièrement indéterminée (les extrants seraient indépendants des intrants). Pour cela, il est nécessaire de définir une contrainte qui affirme que le rapport existant entre ces flux est égal à une constante. Dans le cas d'une technologie simple (un seul flux de commodité), le rapport d'efficacité entre l'intrant et l'extrant représente le rendement classique. Pour chaque technologie, on fournira une valeur pour le ratio d'efficacité **FLOFUNC** entre les groupes **cg1** de commodités intrants et extrants **cg2**.

$$\sum \text{FLOW}_{cg2} = \text{FLOFUNC} \times \sum \text{FLOW}_{cg1}$$

### Limitation d'une commodité dans un flux

Les groupes de commodité contiennent plus qu'une commodité. Pour limiter la part de chaque commodité dans son propre groupe, TIMES peut imposer une contrainte **FLOSHAR** (c) qui représente la contrainte de limitation de la part de chaque commodité dans un flux.

$$\text{FLOW}(c) \leq \geq = \text{FLOSHAR}(c) \times \sum \text{FLOW}$$

$\leq, \geq, =$  : (bas, moyen, haut).

## 5. Conclusion

Nous venons de décrire brièvement le fonctionnement de notre modèle. Pour des détails sur le fonctionnement du générateur de modèle TIMES, consulter la documentation de TIMES [Loulou et al, 2005]. Ce fonctionnement sera identique pour les différents secteurs que nous avons modélisés.

Nous présentons maintenant les secteurs que nous avons modélisés au travers d'un exemple permettant d'illustrer la méthodologie en insistant sur les spécificités de chacun d'entre eux. Le détail de tous les secteurs se trouve en annexe.

## 6. Bibliographie

### **[AIE, 1998]**

AIE, Mapping the Energy Future, Energy Modeling and Climate Change Policy, Energy and Environment, Policy Analysis Series, AIE, 1998.

### **[Armatte, 2005]**

Armatte M., La Notion de Modèle dans les sciences Sociales, Anciennes et Nouvelles Significations, 91-123, Mathematics and Social Sciences 172, 2005.

### **[Assoumou, 2006]**

Assoumou E., Modélisation MARKAL pour la Planification Energétique Long Terme dans le Contexte Français, thèse de l'Ecole des Mines de Paris, 2006.

### **[Berglund et al., 2006]**

Berglund C., Söderholm P., Modeling technical change in energy system analysis: analyzing the introduction of learning-by-doing in bottom-up energy models, 1344-1356, Energy policy 34, 2006.

### **[BFP, 2006]**

Bureau Fédéral du Plan, La politique Climatique post 2012, Analyses des Scénarios de réductions d'émissions de aux horizons 2020 et 2050, analyse et prévisions économiques, 2006

### **[Borges, 1986]**

Borges A. M., Applied General Equilibrium Models, an Assessment of their Usefulness for Policy Analysis, INSEAD, 1986.

### **[Boulanger et al, 2003]**

Boulanger P. M., Bréchet T., Une Analyse Comparative des Classe de Modèles, Modélisation et aide à la décision pour un développement durable, Action de support PADD I, SSTC, 2003.

### **[Deleau et al, 1986]**

Artus P., Deleau M., Malgrange P. (1986), Modélisation macroéconomique, Economica, Collection Economie et Statistiques Avancées, Paris.

### **[DOE/EIA, 2003]**

Model Documentation Report: System for the Analysis of Global Energy Markets (SAGE), Volume 1, 2, 2003.

### **[Finon, 2003]**

Finon D., Prospectives énergétiques et modélisation, Note au conseil scientifique de l'institut français de l'énergie, 2003.

### **[Finon, 2004]**

Finon D., Prospective énergétique et modélisation de long terme, Les voies de progression méthodologique, 3-15, Revue de l'Energie 553, 2004.

**[Fishbone et al, 1983]**

Fishbone L. G., et al., User's Guide for MARKAL (BNL/KFA Version 2.0), A Multi-period, Linear-programming Model for Energy Systems Analysis, IEA, ETSAP, 1983.

**[Le Henaff, 2005]**

Le henaff C., Pignon V., « Compréhension des modèles d'équilibre general calculable et leur portée dans les couplages avec des modèles technico-économiques », EDF, 2005.

**[Lorna et al, 2007]**

Lorna A. G., et al., Modeling of industrial energy consumption: An introduction and context, 599-608, Energy Economics, 2007.

**[Löschel, 2002]**

Löschel A., Technological change in economic models of environmental policy: a survey, 105-126, Ecological Economics 43, 2002.

**[Loulou et al, 1997]**

Loulou R., et al., Prospective énergétique au Québec, Le modèle MARKAL-Québec, GERAD, 1997.

**[Loulou at al, 2004]**

Loulou R., et al., Documentation for the MARKAL model, ETSAP, 2004.

**[Loulou et al, 2005]**

Loulou R., et al., Documentation for the TIMES model Partie 1, 2, 3, ETSAP, 2005

**[Murphy et al, 2007]**

Murphy R., et al., Hybrid modeling of industrial energy consumption and greenhouse gas emissions with an application to Canada, 826-846, Energy Economics, 2007.





---

## **CHAPITRE III**

### ***CHOIX ADOPTÉS POUR LA MODELISATION DE L'INDUSTRIE***

---

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>87</b>
<b>2. STRUCTURE D'UN MODÈLE TIMES ADAPTÉ À L'INDUSTRIE .....</b>	<b>87</b>
2.1. UNE DIVERSITÉ DANS LES TYPES ET LES MODES DE CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES. ...	88
2.1.1. <i>Des consommations énergétique directes et indirectes dans l'industrie</i> .....	88
2.1.2. <i>Polyvalence de la chaleur produite</i> .....	89
2.2. L'ARCHITECTURE DU MODÈLE INDUSTRIE : UNE REPRÉSENTATION COMMUNE .....	90
2.3. LES IGCE : UNE MODÉLISATION PAR PROCÉDÉ .....	91
<b>3. LES DONNÉES : UN PILIER POUR L'ÉTABLISSEMENT D'UN MODÈLE .....</b>	<b>93</b>
3.1. DIVERSITÉ DES SOURCES DE DONNÉES .....	93
3.2. LA CONSTRUCTION DU SYSTÈME DE RÉFÉRENCE : CHOIX D'UN NIVEAU D'AGRÉGATION .	94
3.3. PALLIER À L'ABSENCE DE DONNÉES : LE REGROUPEMENT GÉOGRAPHIQUE.....	100
3.4. MODÈLE EUROPE : TRANSPOSITION DU MODÈLE FRANCE.....	102
<b>4. LES CHOIX ENGAGÉES DANS LA REPRÉSENTATION DU MODÈLE TIMES INDUSTRIE.....</b>	<b>104</b>
4.1. LE CHOIX DU PAS DE TEMPS : L'ANNÉE S'IMPOSE .....	104
4.1.1. <i>Découplage entre les données du modèle et l'horizon de temps : une possibilité d'ajustement</i> .....	104
4.1.2. <i>L'année de base : un calage nécessaire</i> .....	104
4.2. CAPACITÉ RÉSIDUELLE : DÉTERMINANTE POUR LE RYTHME DE REMPLACEMENT DES ÉQUIPEMENTS .....	105
4.2.1. <i>Équipements de production à l'année de référence</i> .....	105
4.2.2. <i>La durée de vie des équipements n'est pas toujours fixe</i> .....	108
4.2.3. <i>Durée de vie de la capacité résiduelle : une approche par zone géographique</i> ...	109
4.2.4. <i>Comment gérer « le revamping », le remplacement partiel des équipements</i> .....	110
4.2.4.1. La capacité résiduelle connue.....	111
4.2.4.2. La capacité résiduelle inconnue .....	112
4.3. BASE DES NOUVELLES TECHNOLOGIES : UN ÉLÉMENT DÉTERMINANT.....	112
4.4. APPROVISIONNEMENT EN ÉNERGIE ET MATIÈRES PREMIÈRES : INFLUENCE SUR LES CHOIX D'INVESTISSEMENT.....	119
4.5. LES ÉMISSIONS DE CO <sub>2</sub> DANS L'INDUSTRIE : UNE REPRÉSENTATION PLUS FINE .....	121
4.6. PARTICULARITÉS POUR LA FRANCE : LA MODÉLISATION DES CHAUDIÈRES, UNE SEGMENTATION PAR TYPE DE CHAUDIÈRE .....	123
4.6.1. <i>Durée de vie et disponibilité des chaudières : une segmentation par type de chaudière</i> .....	125
4.6.2. <i>Pertes de chaufferie et pertes de distribution, un élément à prendre en compte</i> ...	125
<b>5. QUELQUES SPÉCIFICITÉS DANS NOTRE REPRÉSENTATION DU MODÈLE TIMES INDUSTRIE.....</b>	<b>126</b>
5.1. L'INDUSTRIE VALORISE SES COPRODUITS .....	126
5.1.1. <i>La valorisation interne des coproduits : comment assurer la consistance de TIMES</i>	126
5.1.2. <i>La valorisation inter-sectoriel dans le modèle industrie</i> .....	128
<b>6. CONCLUSION .....</b>	<b>129</b>
<b>7. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>130</b>

### ➤ **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Les équipements de l'année de référence.....	107
Tableau 2 : Technologies modélisées pour l'industrie du papier.....	114
Tableau 3 : Technologies modélisées pour les matériaux de construction.....	115
Tableau 4 : Technologies modélisées pour les autres matériaux de construction.....	116
Tableau 5 : Technologies modélisées pour la sidérurgie.....	117
Tableau 6 : Technologies modélisées pour l'industrie du verre.....	117
Tableau 7 : Technologie d'importation d'énergie.....	120
Tableau 8 : Technologies d'importation de matières premières.....	121
Tableau 9 : Répartition par types d'énergie.....	124
Tableau 10 : Répartition des types d'énergie par types de paramètre.....	124

### ➤ **LISTE DES FIGURES**

Figure 1 : Schéma sommaire de la représentation des consommations énergétique dans l'industrie.....	87
Figure 2 : Répartition des consommations énergétiques sous et hors chaudières en %.....	88
Figure 3 : Répartition des consommations de combustibles par secteur industriel en %.....	89
Figure 4 : Structure des consommations énergétique dans l'industrie : répartition des besoins thermiques.....	90
Figure 5 : Architecture du modèle industrie.....	91
Figure 6 : Système énergétique de référence désagrégé pour la production d'acier.....	95
Figure 7 : Système énergétique de référence agrégé pour la production d'acier.....	96
Figure 8 : Système énergétique de référence désagrégé pour l'industrie du papier.....	97
Figure 9 : Système énergétique de référence agrégé pour l'industrie du papier.....	97
Figure 10 : Système énergétique de référence pour l'industrie du ciment I.....	98
Figure 11 : Système énergétique de référence pour l'industrie du ciment II.....	99
Figure 12 : Système énergétique de référence pour l'industrie du ciment III.....	99
Figure 13 : Système énergétique de référence pour l'industrie du ciment IV.....	100
Figure 14 : Croissance économique (%) et PIB/habitant (base 100 moyenne européenne) par pays de l'UE-27.....	101
Figure 15 : Répartition du périmètre géographique.....	101
Figure 16 : Ratios de consommation énergétique pour le reste des pays européens à l'image de la France, dans le cas de la sidérurgie.....	103
Figure 17 : Ratios de consommation énergétique pour le reste des pays européens à l'image de la France, dans le cas de l'industrie du papier.....	103
Figure 18 : Répartition des périodes du modèle.....	104
Figure 19 : Taux de recyclage dans l'industrie.....	108

Figure 20 : Représentation de la variation de la capacité résiduelle .....	109
Figure 21 : Représentation de la durée de vie de la capacité résiduelle .....	109
Figure 22 : Structure de la capacité résiduelle pour la sidérurgie en Allemagne .....	110
Figure 23 : Structure de la capacité résiduelle pour la sidérurgie en France.....	111
Figure 24 : Évolution de la capacité résiduelle .....	112
Figure 25 : Évolution de la capacité résiduelle .....	112
Figure 26 : Schéma sommaire d'une machine à papier.....	117
Figure 27: Représentation du four à arc dans le modèle industrie .....	118
Figure 28 : Part des spéciaux dans la consommation totale des combustible dans l'industrie du ciment .....	118
Figure 29: La valorisation des produits dans l'industrie de la sidérurgie .....	126
Figure 30 : La valorisation des produits dans l'industrie du papier .....	127
Figure 31 : schéma descriptif de la construction d'une technologie fictive .....	127
Figure 32 : Consommation du laitier issu de la sidérurgie pour la fabrication du ciment .....	128
Figure 33 : Exemple pratique sur la valorisation des produits .....	129

## 1. Introduction

Dans les chapitres précédents nous avons exposé les problématiques énergétiques et environnementales et leurs impacts sur les industries grandes consommatrices d'énergie (IGCE), la nécessité du long terme et le choix d'un générateur de modèle pertinent pour une représentation adéquate du système énergétique dont il est question

L'objectif du présent chapitre est d'exposer la construction (les choix engagés) et les particularités du modèle industrie proposé dans le cadre de cette thèse. Une des lignes directrices de ces recherches est la construction d'un modèle complet et détaillé des IGCE, pour une analyse pertinente des résultats. Par conséquent, la disponibilité des données est au centre de cette approche, car une telle application manipule de grandes quantités de données et la disponibilité de celles-ci orientent nos choix quant à la construction du modèle.

## 2. Structure d'un modèle TIMES adapté à l'industrie

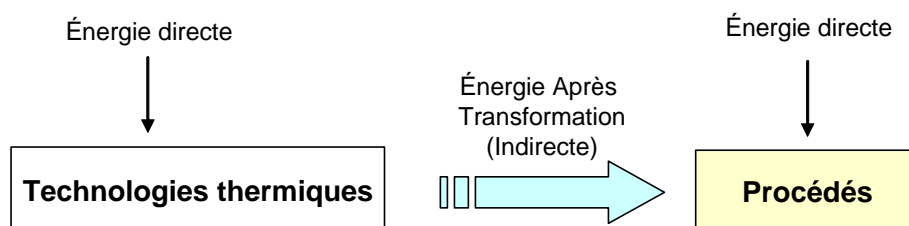
La pertinence d'un modèle énergétique se mesure à l'étendue des options possibles (énergétiques, technologiques) du système énergétique de référence. Dans le cas de l'industrie, l'intérêt d'une telle structure, est de pouvoir explorer toutes les marges de manœuvres pour s'adapter à un contexte économique, que ce soit par le choix des énergies ou par les choix technologiques. Ainsi, la représentation de l'industrie sera plus proche de la réalité donc plus précise. En outre chaque procédé peut être identifié individuellement par sa consommation énergétique, ses émissions de CO<sub>2</sub> et les économies d'énergie réalisées.

La construction d'un tel modèle nécessite une connaissance approfondie de la structure de production notamment la composition énergétique de l'industrie. Par conséquent, il est impératif de statuer sur la répartition des consommations énergétiques et les particularités de chaque secteur industriel. En effet, cette perception de l'industrie couplée à la disponibilité des données, oriente nos choix quant à la construction du modèle.

L'industrie est structurée par deux critères :

- d'une part les consommations énergétiques par type de combustible,
- d'autre part les usages énergétiques directs et/ou indirects au niveau des procédés de fabrication (Figure 1), avec des disparités selon le sous-secteur d'activité.

La section qui suit va mettre évidence ces aspects.



**Figure 1 : Schéma sommaire de la représentation des consommations énergétique dans l'industrie**

## 2.1. Une diversité dans les types et les modes de consommations énergétiques.

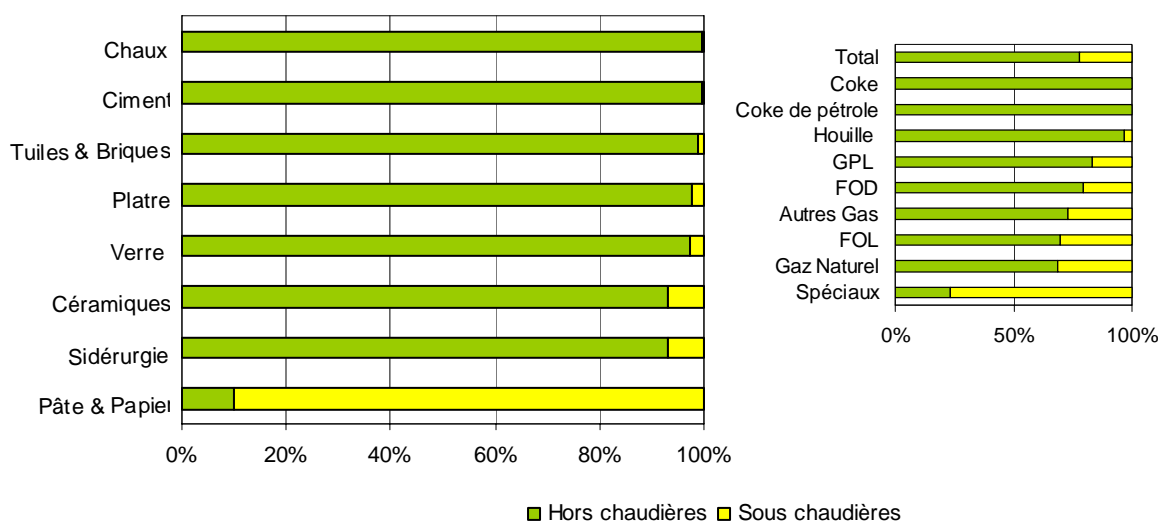
### 2.1.1. Des consommations énergétique directes et indirectes dans l'industrie

Les consommations énergétiques de l'industrie sont réparties en deux types :

Les consommations indirectes d'énergie (sous chaudière) : concernent l'énergie primaire transformée d'abord sous forme de vapeur (chaleur) et d'électricité (énergie finale) par des installations thermiques (chaudières, turbines), pour être utilisée par la suite au niveau des procédés de fabrication. Elles concernent aussi la part de l'électricité achetée et utilisée pour la production de la vapeur (chaudière électrique).

Les consommations directes d'énergie (hors chaudière) : concernent les consommations de combustibles et d'électricité achetés et utilisés directement au niveau du procédé.

Cependant, dans les IGCE la part de chaque type de consommation est très variable d'un secteur à un autre. Par exemple, les consommations indirectes représentent 90% dans l'industrie du papier, alors que ce pourcentage est de 1 % pour l'industrie du plâtre.

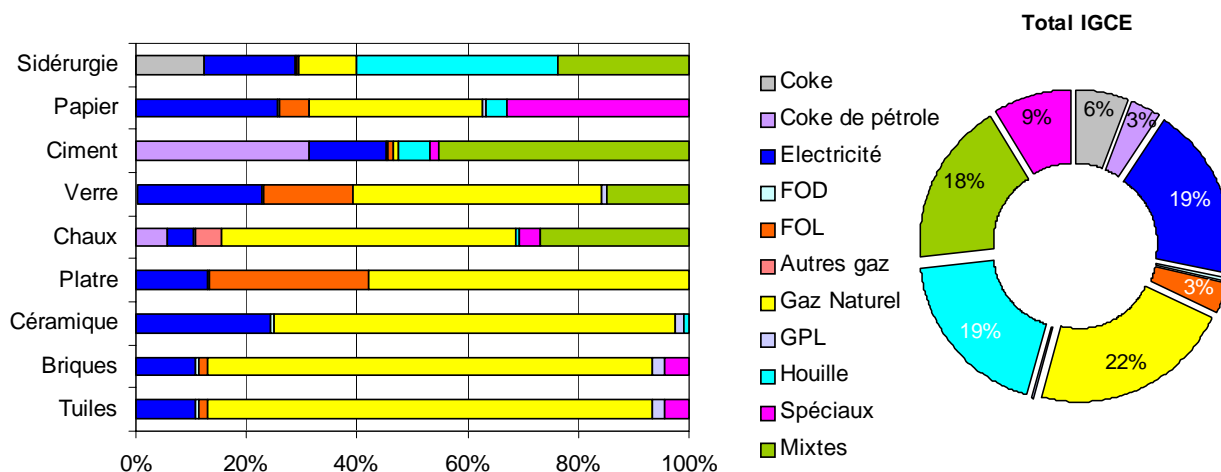


Réalisé à partir des données CEREN

**Figure 2 : Répartition des consommations énergétiques sous et hors chaudières en %**

Pour des parts relativement faibles, les consommations énergétiques sous chaudières peuvent être considérables (Exemple : la sidérurgie ; la part des consommations énergétiques sous chaudière représente 6TWh soit 7% du total des consommations énergétiques du secteur).

En plus du fait que les consommations énergétiques sont réparties en consommations directes et indirectes, la répartition des combustibles dans chaque type de consommation est totalement différente selon les secteurs d'activité.



Réalisé à partir des données CEREN

**Figure 3 : Répartition des consommations de combustibles par secteur industriel en %**

Les combustibles spéciaux représentent 9 % pour l'ensemble de l'industrie. Ils se composent principalement de la liqueur noire<sup>1</sup> et des déchets de bois (biomasse). Ils sont majoritairement répartis dans l'industrie du ciment et du papier. Ils sont utilisés essentiellement pour les usages thermiques (production de chaleur).

Le charbon est particulièrement bien implanté dans la sidérurgie (production du coke), il représente 19 % de l'ensemble de l'industrie.

Le gaz naturel représente 22 % pour l'ensemble de l'industrie, il est particulièrement bien implanté dans les industries du verre, chaux, plâtre, brique, tuiles et céramique.

L'électricité avec 19 % pour l'ensemble de l'industrie, est essentiellement consommée pour les usages mécaniques (force motrice) et l'éclairage.

Le coke de pétrole est majoritairement consommé dans l'industrie du ciment.

### 2.1.2. Polyvalence de la chaleur produite

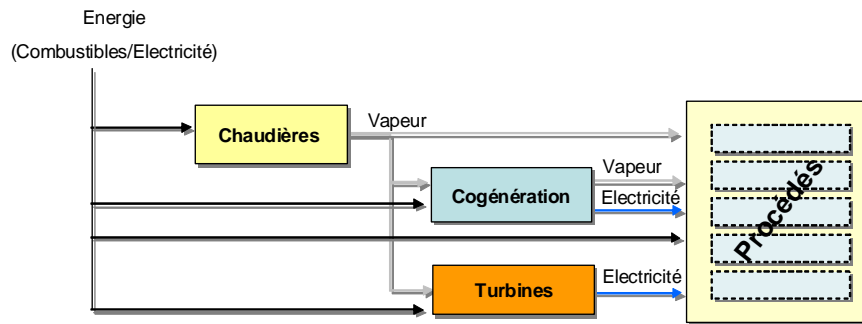
La vapeur produite sous chaudière n'est pas seulement utilisée pour les besoins directs du procédé. Elle est utilisée par ailleurs pour :

- la production d'électricité et de la chaleur à basse pression (cogénération),
- la production d'électricité (turbine).

La répartition des usages de la vapeur (procédé, turbine, cogénération) est distincte par secteur d'activité. Pour certains secteurs industriels, les technologies thermiques sont quasi-marginales voir inexistantes. La Figure 4 ci-dessous reprend la structure et la répartition des besoins thermique dans l'industrie grosse consommatrice d'énergie.

<sup>1</sup> Liqueur noire : Résidu de l'industrie papetière





**Figure 4 : Structure des consommations énergétique dans l'industrie : répartition des besoins thermiques**

Dans le cas de la sidérurgie plus d'un tiers de la vapeur (produite + achetée) est utilisée pour les besoins du procédé, le reste sert à la production de l'électricité, dont presque la moitié est renvoyée sur le réseau.

Pour le papier, plus de la moitié de la vapeur (produite + achetée) est utilisée pour les besoins du procédé, le reste est utilisé pour la production de l'électricité et de la vapeur à basse pression. L'industrie du papier est autosuffisante de ses besoins énergétiques.

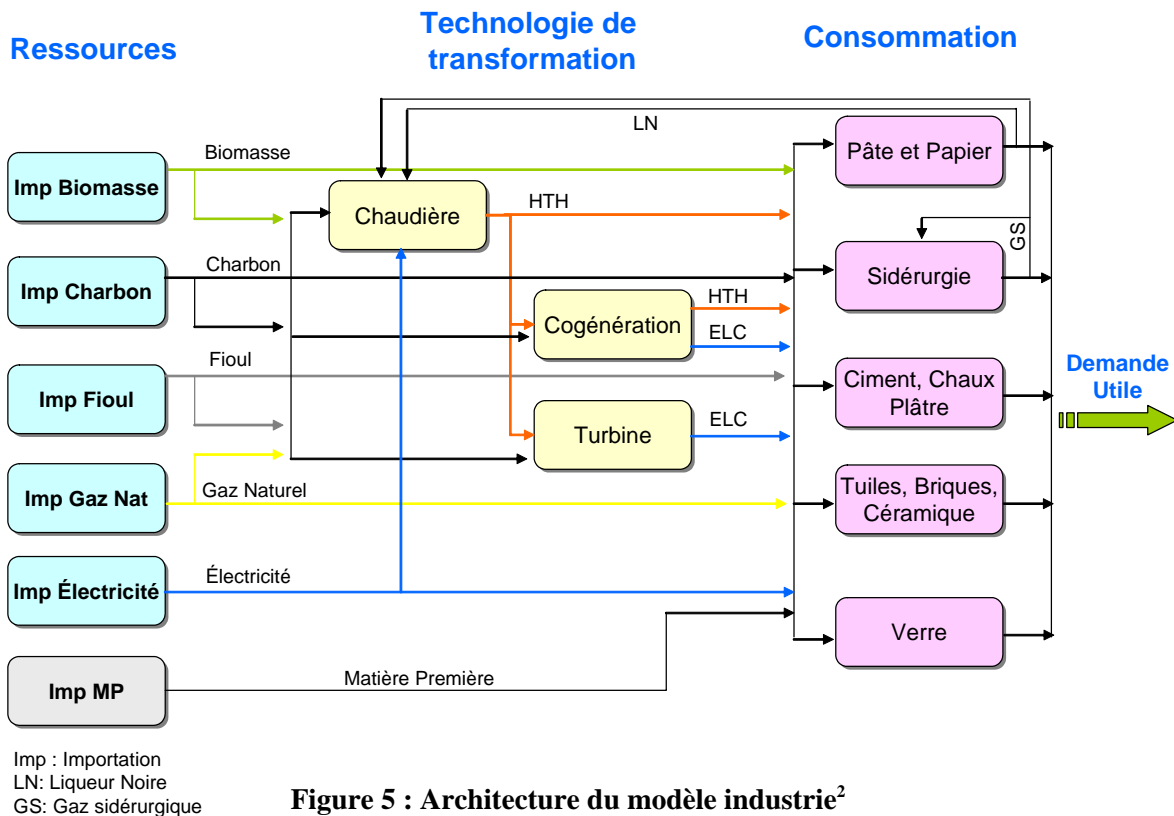
Après avoir statué sur l'agencement des différents éléments de l'industrie notamment la répartition des consommations énergétiques. La section qui suit va mettre en exergue l'architecture adaptée à la construction du modèle industrie.

## 2.2. L'architecture du modèle industrie : une représentation commune

La structure de l'industrie telle qu'elle a été exposée ci-dessus est identique pour chaque secteur industriel, avec des consommations énergétiques sous chaudière plus ou moins importantes. Par conséquent, la structure du modèle industrie est construite pour chaque secteur industriel, de façon à reprendre dans le détail les mêmes agencements entre les différentes phases de production. Cela explique la prise en compte des spécificités de chaque secteur industriel au niveau des installations énergétiques, ainsi qu'au niveau des procédés de fabrication.

Le système énergétique de référence ci-dessous (Figure 5) représente l'architecture globale du modèle industrie qui est appliquée pour chaque secteur et pour chaque pays. Cette architecture ne représente que les opérations similaires entre les secteurs. Dans chaque segment, le type, le nombre et les caractéristiques techniques et économiques des procédés sont propre à chaque secteur et pour chaque pays.

Les segments des secteurs industriels ne sont pas tous traités au même niveau de détail. Un accent particulier a été mis sur la pâte à papier, la sidérurgie et le ciment (secteurs à fortes consommations énergétiques et émissions de CO<sub>2</sub>). De plus, un développement particulier a été accordé à la France avec un système énergétique plus approfondi que le reste des pays européens.

Figure 5 : Architecture du modèle industrie<sup>2</sup>

Dans chaque segment, plusieurs technologies sont en compétition pour satisfaire la demande finale. Chaque technologie y est décrite d'une manière explicite et détaillée par un certain nombre de paramètres techniques et économiques (cf. Chapitre 3).

La désagrégation jusqu'au niveau des chaudières dans le modèle TIMES industrie permet plus de flexibilité dans les choix technologiques, ce qui assure une représentation plus affinée de l'industrie. En effet, avec cette représentation plus complète, le spectre des choix technologiques n'est pas limité uniquement aux procédés de production.

### 2.3. Les IGCE : une modélisation par procédé

Dans le cas des IGCE, la possibilité de délimiter chaque phase de production distinctement (le caractère gros procédés de production) associée à la production homogène de chaque produit exprimée en tonne, a permis d'adapter une approche de modélisation par procédé. Pour le reste de l'industrie où la production est très diffuse et hétérogène (multi-produits et multi-procédés) l'approche de modélisation par usage est la plus adaptée (une thèse sur l'approche de modélisation de l'industrie diffuse (ID) est lancée).

De ce fait, le modèle :

- désagrège les secteurs industriels, les opérations de production, les consommations d'énergies et de matières premières,
- inclut la production de chaleur et la cogénération associée. Une particularité qui assure une plus grande cohérence dans la représentation de l'industrie. Les cogénérations et

<sup>2</sup> Les GPL, les FOD et les Spéciaux ne sont pas représentés afin de ne pas surcharger la figure.

les chaudières sont tirées par la demande en chaleur et en vapeur des technologies de production,

- décrit une base technologique nouvelle avec des spécificités régionales et sectorielles pour remplacer les technologies obsolètes,
- n'inclut pas d'effet retour sur l'économie.

Le modèle optimise sur l'horizon d'étude en une fois. Le résultat de cette optimisation contient donc les productions finales par sous-secteur d'activité, sur la base des évolutions de la demande (prise en compte des nouveaux investissements réalisés), les consommations énergétiques et les émissions de CO<sub>2</sub> associées à chaque niveau de production :

**Les usages spécifiques de combustibles** : la demande d'énergie est calculée sur la base des consommations spécifiques par produit. Elle est égale à la somme des consommations spécifiques de chaque combustible multipliée par la production de chaque type de produit.

$$CTcomb = \sum_i \sum_j Cscomb_i \times Pprod_j$$

*CTcomb* : Consommation totale combustibles

*Cscomb<sub>i</sub>* : Consommation spécifique du combustible *i*, elle représente la consommation par unité de production.

*Pprod<sub>j</sub>* : Production du produit *j*

**Les usages thermiques** : la demande d'énergie est exprimée d'abord en terme d'énergie finale, sur la base des besoins unitaires par produit et par sous-secteur d'activité. La conversion en énergie primaire est assurée par les rendements des technologies choisies.

$$Cscomb_i = \frac{Cstherm_i}{\rho_i}$$

*Cstherm<sub>i</sub>* : Consommation spécifique thermique

*ρ<sub>i</sub>* : Rendement énergétique du combustible *i*

**Les usages spécifiques d'électricité** : la demande d'énergie finale est directement égale à la consommation par produit multipliée par la production de chaque type de produit.

$$CTelec = \sum_j Cselec \times Pprod_j$$

*CTelec* : Consommation totale électricité

*Cselec* : Consommation spécifique électricité

**Les autres usages énergétiques hors procédé (éclairage et chauffage des locaux) :**

la consommation énergétique de l'industrie pour l'éclairage est très faible, elle représente 2% de l'ensemble des consommations électriques. Des disparités sont observées selon le sous-secteur d'activité : la part de l'éclairage se situe entre 6% pour l'industrie de la céramique et 1 % pour la sidérurgie. L'éclairage est utilisé dans les ateliers de production et dans l'espace administratif (bureaux) avec des types d'éclairage variables selon l'utilité.

La part du chauffage des locaux dans la consommation totale de l'industrie s'élève qu'à 5%.

Les faibles consommations énergétiques pour l'éclairage et le chauffage des locaux ont été directement intégrés aux consommations spécifiques des procédés de production.

**L'impact environnemental :** les émissions de CO<sub>2</sub> sont calculées à partir du produit entre les facteurs d'émission associés à chaque combustible  $i$  ( $Femis_i$ ) et la consommation du combustible  $i$  ( $Ccomb_i$ ).

$$ECO_2 = \sum_i Femis_i \times Ccomb_i$$

### 3. Les données : un pilier pour l'établissement d'un modèle

La base de données des technologies actuelles et futures est l'élément fondamental dans les étapes de construction d'un modèle. Elle permet d'orienter et de justifier les choix engagés tout au long du processus de modélisation.

Le recours à des sources de données très diverses est le meilleur moyen pour compléter, structurer et valider la base de données. Par conséquent, l'absence de donnée restreint facilement les objectifs les plus ambitieux et limite l'éventail de choix quant à la construction d'un modèle. De ce fait, il est indispensable, voire même capital, de procéder à des approches ou des approximations issues de l'étude de nombreux documents et d'entretiens avec les experts de chacun des domaines abordés.

Dans cette partie, on détaillera :

- les bases de données consultées (utilisées),
- la construction d'un système énergétique de référence en adéquation avec les données disponibles,
- les approximations effectuées consécutivement au manque de certaines données.

#### 3.1. Diversité des sources de données

Les données consultées sont réparties en deux types :

- les données publiques dont le détail est exposé dans les annexes
- les données privées dont l'usage est limité uniquement à EDF R&D et ses partenaires associés. Par mesure de confidentialité et de liberté d'exploitation, ces données ne sont en aucun cas exposées dans cette étude.

L'ensemble des données requises pour permettre la réalisation de cette thèse se base sur les données de consommations spécifiques par procédé de fabrication estimées par le **CEREN**<sup>3</sup> (Centre d'Études et de Recherche Économiques sur l'Énergie) et les données de consommation spécifique d'**ULCOS** (Ultra Low CO<sub>2</sub> Steel Making) pour la sidérurgie.

Les données technico-économiques et les informations additionnelles concernant particulièrement les nouvelles technologies sont basées sur : **EDF R&D** (Electricité de

---

<sup>3</sup> Les données de CEREN sont issues d'une exploitation globale de quatre années d'enquêtes. Les profils énergétiques du CEREN représentent une description détaillée du parc de production, ainsi que la répartition des flux énergétique par atelier et par usage. L'aspect complexe de la représentation de ces données rend leur exploitation très difficile. Certains ajustements ont été adoptés pour permettre le bouclage des données désagrégées par rapport aux résultats finaux (agrégés).

France, centre de recherche et développement, département EPI), **CTP** (Centre technique du papier), **COPACEL** (la confédération française de l'industrie des papiers, cartons et celluloses), **VTT** (Technical Research Centre of Finland), **ICARUS 4** (Sector study for the Iron and steel industry, Paper and board industry and the graphical industry) [Alsema, 2000 a, b, 2001 a, b ; Michels, 2000 ; Nieuwlaar, 2000, 2001], [de Beer, 2000], **MATTER** (Prospects for Energy technologies in the Netherlands), **EUROSTAT**, **ITM** (Innovation & Technology Management), **Jaakko Pöyry Groupe** (Electrowatt-Ekono), **BREF**, **IPTS** (Institute for prospective Technological studies), **Lawrence Berkeley National Laboratory**, **ECOFYS** (Research and Consultancy on Renewable Energy) et l'avis des expert reconnus dans le milieu industriel.

### 3.2. La construction du système de référence : choix d'un niveau d'agrégation

Une des phases clés dans la construction d'un modèle est la représentation du système énergétique de référence (RES). La qualité des résultats dépend fortement du niveau de détail accordé à ce dernier.

Un système énergétique de référence détaillé nécessite une base de données statistique considérable et un niveau de maintenance très élevé. En effet, la représentation d'un système énergétique de référence est en liaison très étroite avec la disponibilité de la donnée statistique. De plus, il faut séparer les deux étapes essentielles :

- L'établissement du modèle à son état initial (année de base) qui représente le système existant à l'année du début de l'horizon de travail.
- L'établissement d'une base de données technologique recensant les technologies existantes et futures qui seront disponibles à un millésime donné.

Plus la base de données des technologies disponibles est riche, plus le système énergétique de référence aura la possibilité d'être détaillé.

Au-delà des considérations sur la disponibilité des données, par mesure purement stratégique, le modélisateur peut orienter, selon ses objectifs, le choix du niveau de détail du RES (agrégé, désagrégé). **Il est important de noter qu'après un certain niveau de détail, il n'est plus pertinent de continuer d'agréger ou de désagréger le RES.** En effet, un détail trop important peut conduire dans la grande majorité des cas à une impossibilité de renseigner la base technologique de façon pertinente et fiable.

La construction d'un système énergétique de référence cohérent ne se borne pas uniquement à la seule disponibilité des données, car elle nécessite de s'approprier une bonne connaissance du secteur à étudier. En effet, certaines opérations ne se prêtent pas réellement à une agrégation car, même si elles aboutissent à des résultats finaux similaires, elles restent très différentes en termes de fonctionnement.

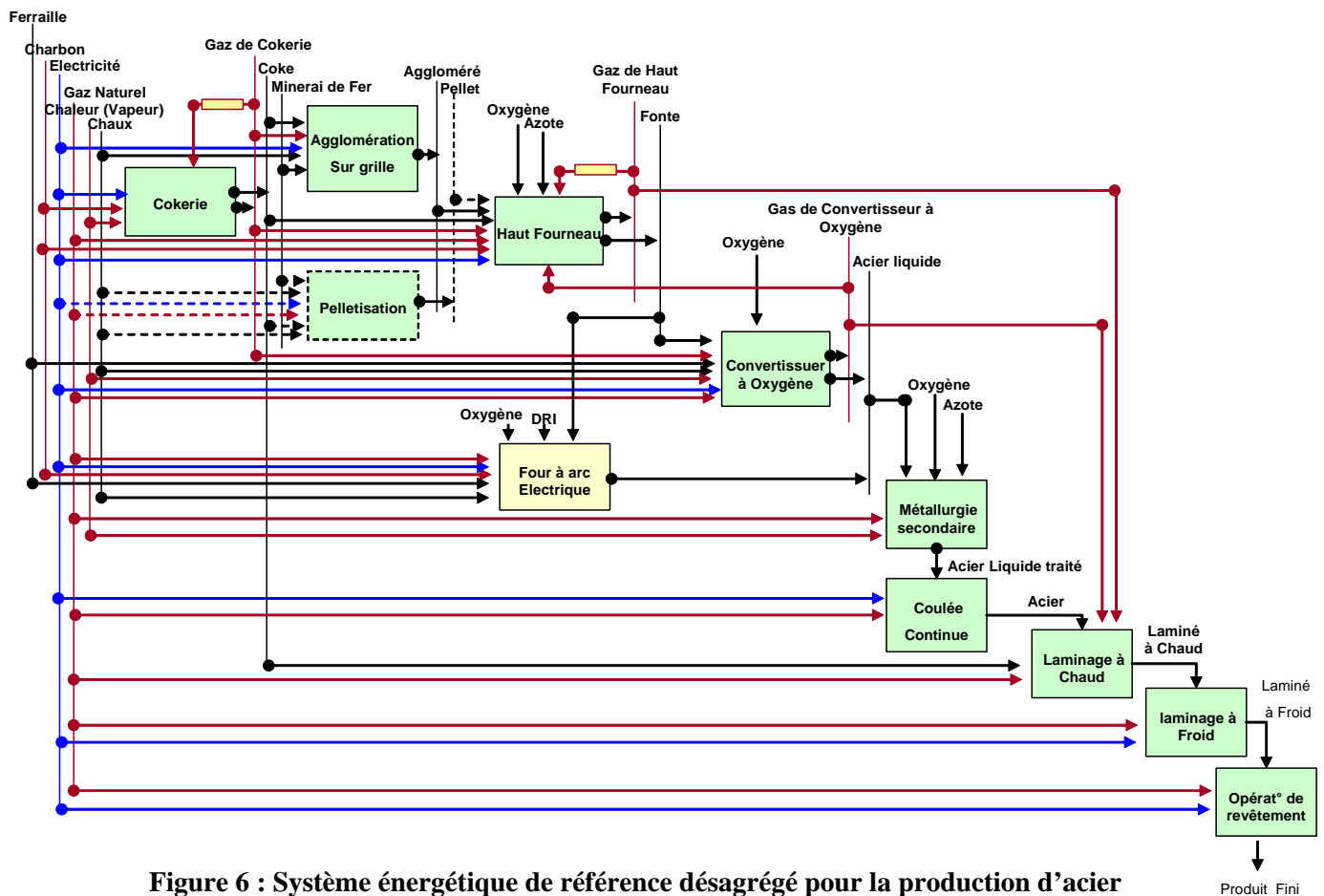
Les exemples ci-dessous mettent en exergue cette notion de niveau de désagrégation, en mettant l'accent sur les limites du système énergétique de référence (agrégé ou désagrégé).

Nous nous sommes attachés à décrire les RES que nous avons construit pour être en mesure de répondre aux questions que nous nous sommes posées pour le secteur des IGCE et dont nous verrons au Chapitre 5 quelques exemples d'analyses.

## La sidérurgie

Dans le cas de la sidérurgie, deux filières de production d'acier distinctes<sup>4</sup> ont été considérées. Chaque filière possède des caractéristiques différentes en termes de consommations énergétiques (au charbon et électrique), de matière première (ferraille et minerai) ou d'investissement.

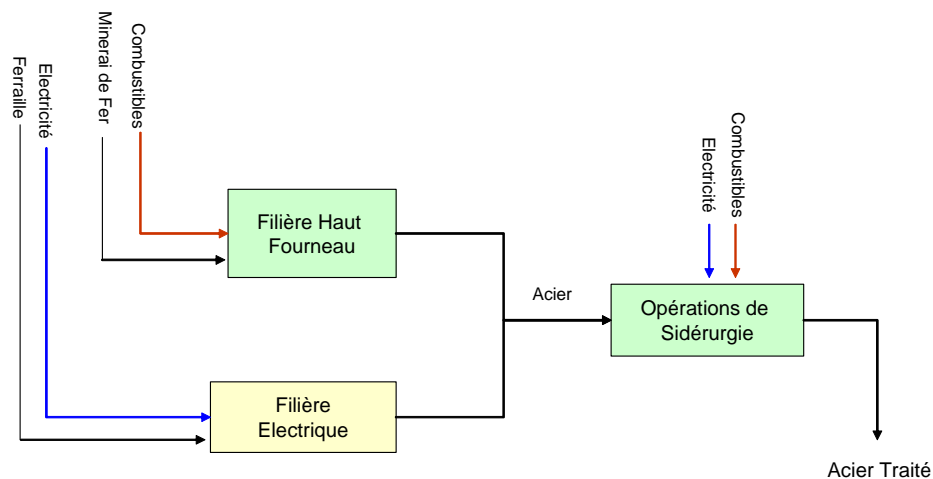
La Figure 6 décrit un RES détaillé de l'industrie de la sidérurgie tenant compte de l'ensemble des filières et des ateliers de production associés. A ce niveau de détail, l'industrie sidérurgique est représentée finement mais les données ne sont pas facilement accessibles. Dans certains cas, le modélisateur sera peut être contraint d'agréger certaines étapes de production afin de rester cohérent avec les données disponibles.



**Figure 6 : Système énergétique de référence désagrégé pour la production d'acier**

La Figure 7 montre le niveau d'agrégation maximal qui conserve les particularités de chaque filière. Au-delà de ce niveau d'agrégation, la représentation de l'industrie de l'acier peut être faussée. En effet, le niveau d'évolution technique de chaque filière peut varier dans le temps et ainsi les estimations à réaliser ne reflèteront pas les estimations effectuées réellement.

<sup>4</sup> Voir annexe II pour plus de détails sur le fonctionnement de chaque filière



**Figure 7 : Système énergétique de référence agrégé pour la production d'acier**

### L'industrie du papier

De même que dans la sidérurgie, l'industrie du papier possède des procédés de fabrication de pâte à papier complètement distincts (consommations énergétiques, type d'énergie, investissement et type de papier à produire).

Au-delà du système énergétique désagrégé présenté Figure 8, l'agrégation maximale qui permet une structure cohérente et des estimations appropriées est représentée par la Figure 9<sup>5</sup>. Un système énergétique de référence agrégeant les différents types de production de pâtes n'assurera pas une prospective fiable (ou des estimations cohérentes). En effet, il existe des marchés de pâte à papier aussi importants que ceux du papier. Il est donc nécessaire de conserver une distinction entre les différents types de pâtes qui n'entrent pas dans les mêmes proportions en fonction des types de papiers produits.

<sup>5</sup> Dans ce système énergétique de référence on peut considérer une seule catégorie de demande et les productions de pâte à papier seront tirées non par un scénario de demande mais par la production du papier.

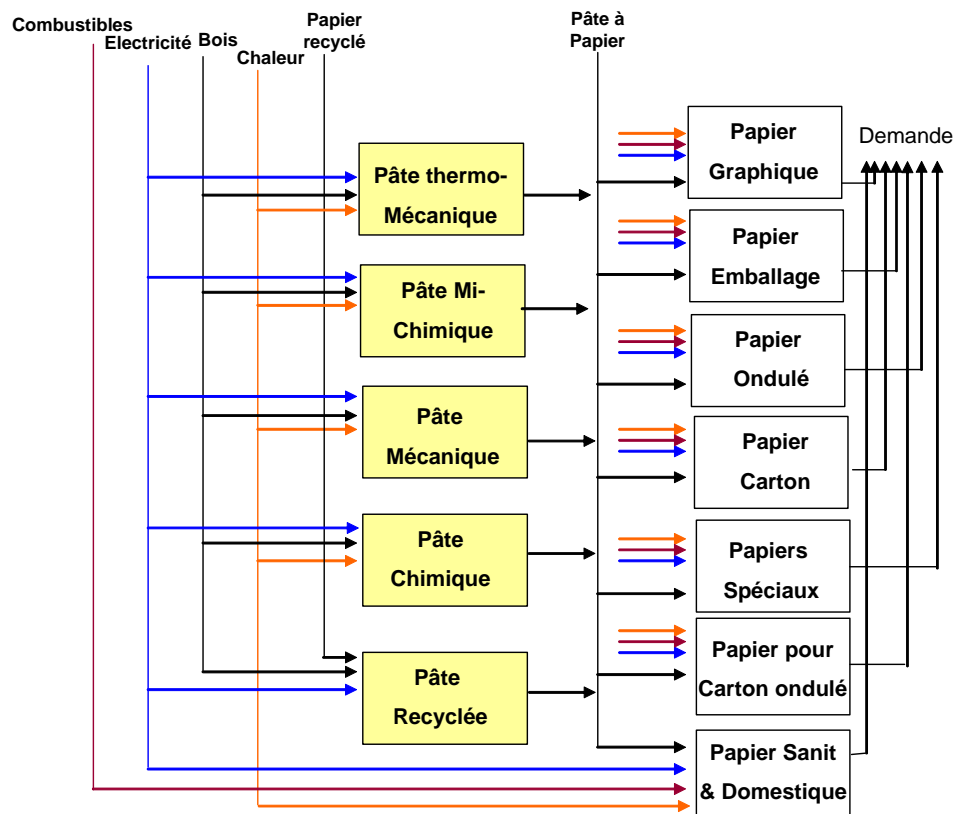


Figure 8 : Système énergétique de référence désagrégé pour l'industrie du papier

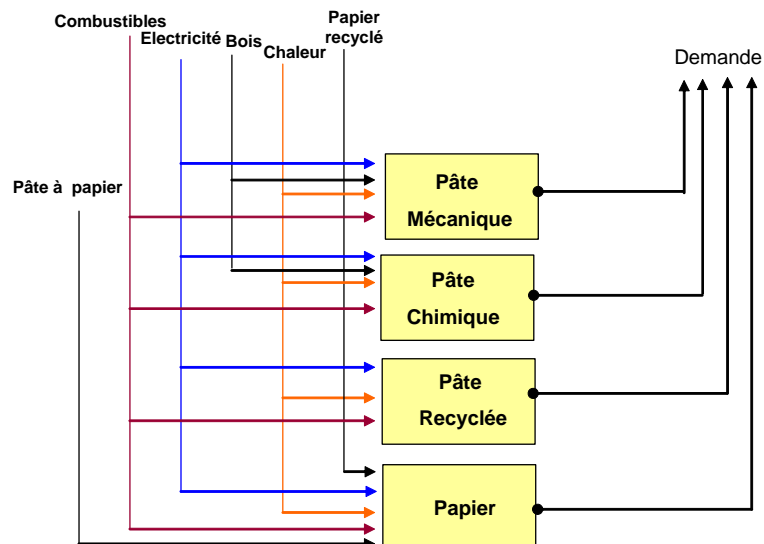


Figure 9 : Système énergétique de référence agrégé pour l'industrie du papier

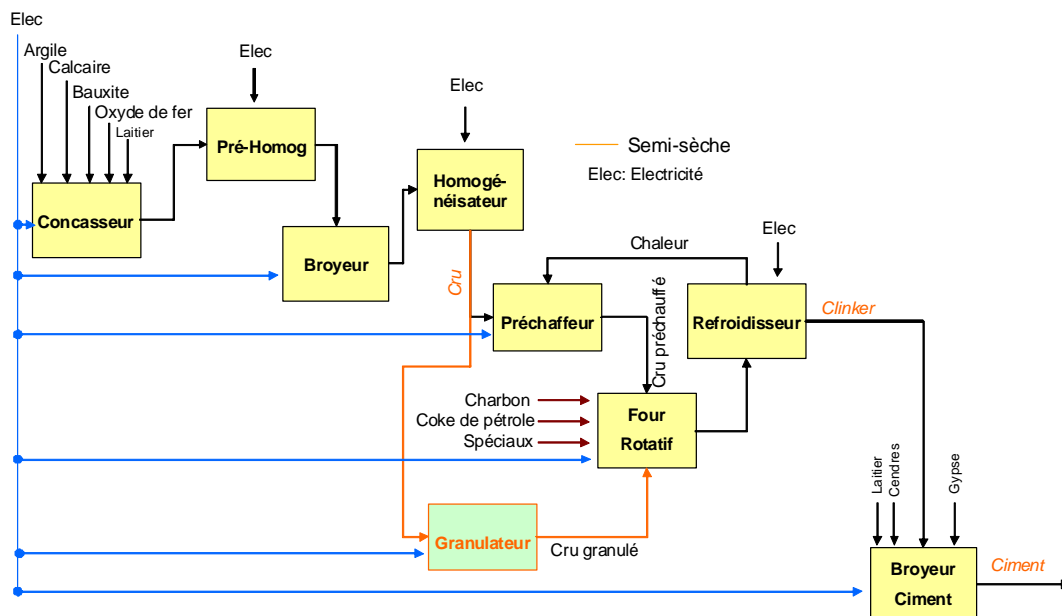


## L'industrie du ciment :

À l'inverse de l'industrie du papier et de la sidérurgie, l'industrie du ciment peut être agrégée de manière à représenter tous les ateliers de production dans un seul bloc (Figure 10 à Figure 13). En effet, l'ensemble des ateliers de production sont complémentaires et non compétitifs entre eux (ce qui n'est pas le cas de la production de la pâte à papier ou d'acier) ; et la structure de la chaîne de production reste presque la même. Donc, agréger l'ensemble des étapes de production ne va pas fausser les estimations à réaliser. Toutefois, il arrive que l'industrie du ciment ne compte que des stations de broyage non équipées de fours (le clinker est importé). Dans ce cas, le RES de la Figure 12 est plus approprié (il prend en compte les deux cas de figure pour la production de ciment).

Les quatre approches à agrégation croissante sont présentées dans les quatre figures suivantes. Chacune permet de répondre à des questions différentes et elles seront utilisées à différentes échelles spatiales (une usine, un pays, l'Europe...). Nous avons choisi le niveau III (Figure 12) pour répondre à des questions au niveau Européen. Le Niveau II (Figure 11) a aussi été utilisé dans le cas de la France car nous avons les données de tous les sites de production de ciment.

Cette approche reste vraie pour la chaux, le verre, la céramique, les tuiles, les briques et le plâtre car le concept reste le même (les systèmes énergétiques de référence de ces industries sont détaillés dans l'annexe).



**Figure 10 : Système énergétique de référence pour l'industrie du ciment I**

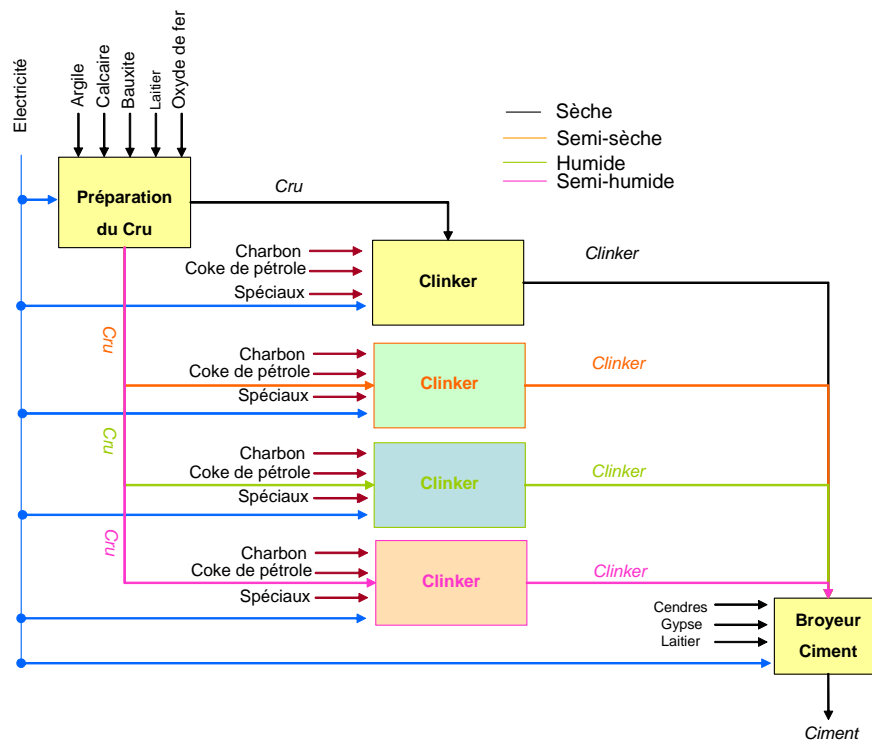
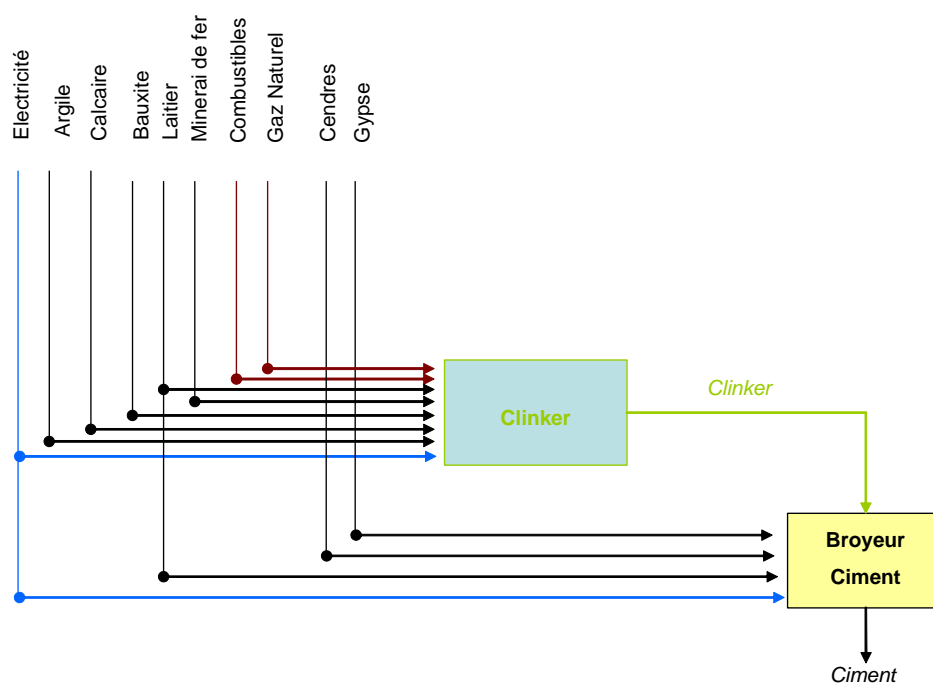
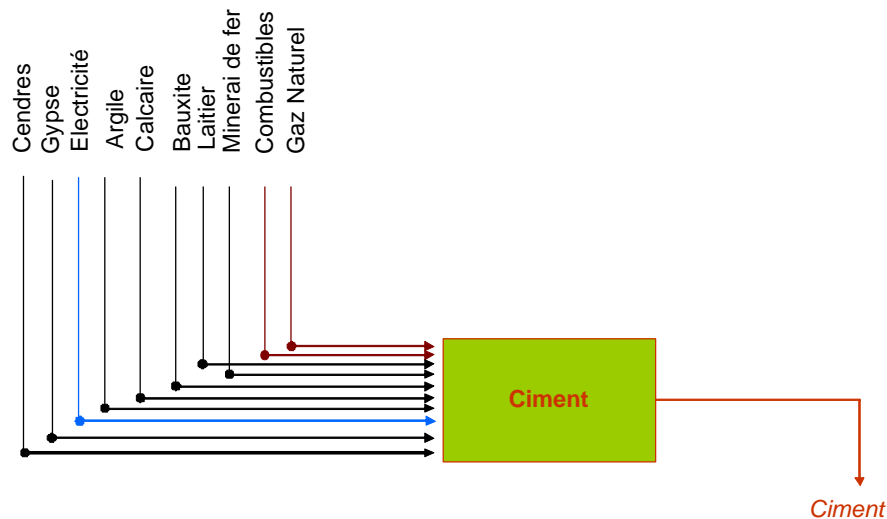
Figure 11 : Système énergétique de référence pour l'industrie du ciment II<sup>6</sup>

Figure 12 : Système énergétique de référence pour l'industrie du ciment III

<sup>6</sup> La voie sèche est la voie la plus dominante dans la production du clinker, elle représente généralement plus du 90 % du total du clinker produit.



**Figure 13 : Système énergétique de référence pour l'industrie du ciment IV**

Nous venons de montrer l'intérêt, dans chacune des filières IGCE considérée, de bien choisir son niveau de désagrégation en fonction des questions que l'on se pose et, bien évidemment, en fonction des données dont on dispose. Cette problématique des données nous amène directement à faire des choix de groupement dans les représentations spatiales (régions et pays), c'est ce que nous détaillons dans le paragraphe suivant.

### 3.3. Pallier à l'absence de données : le regroupement géographique

Le modèle industrie développé dans ce document couvre 29 régions : les 27 pays de l'Union européenne, la Norvège et la Suisse. Pour chaque pays, on a associé 9 secteurs de demande finale (pâte et papier, sidérurgie, verre, ciment, chaux, plâtre, tuiles, briques et céramique).

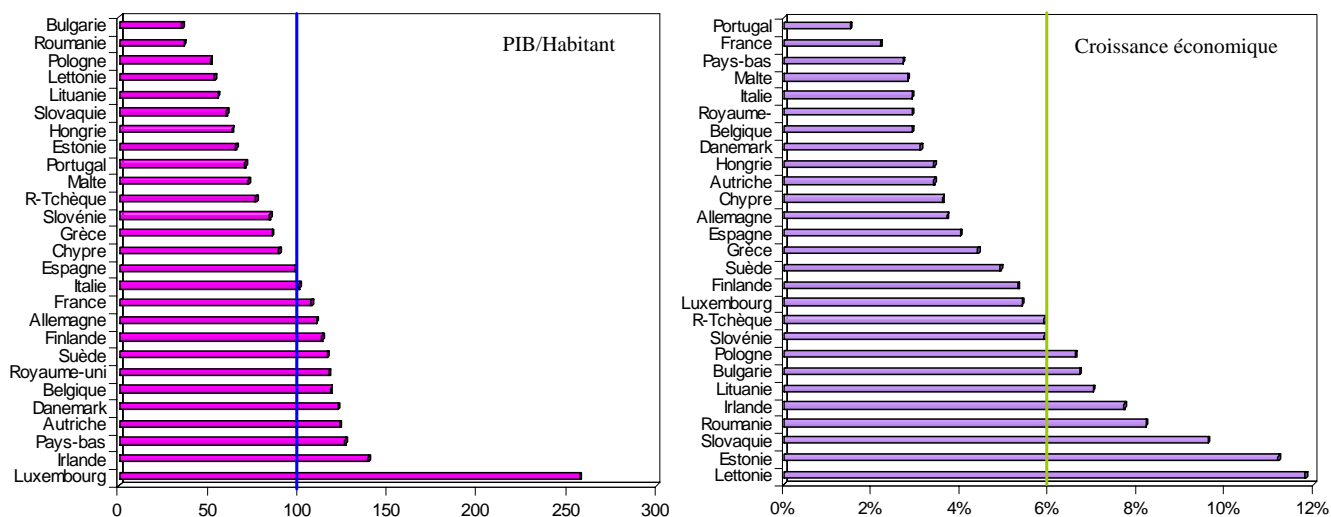
Afin de remédier au problème lié au manque de données, nous avons organisé le périmètre géographique dans le modèle TIMES industrie comme suit :

Les régions sont d'abord regroupées en deux grands groupes et chaque groupe par la suite est subdivisé en plusieurs sous-groupes (

Figure 15) :

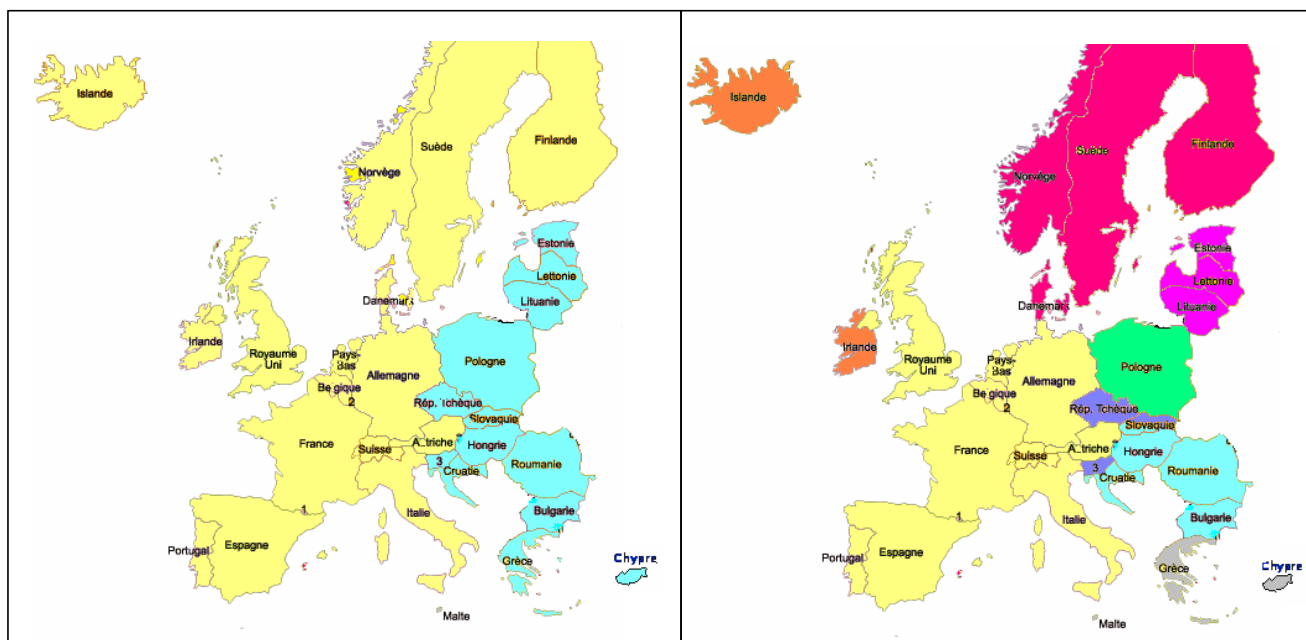
- Le choix de la première répartition (deux groupes) est lié à la représentation des durées de vie des installations existantes et leur évolution dans le temps (voir 4.2.3 Durée de vie de la capacité résiduelle : une approche par zone géographique).
- La seconde répartition (plusieurs sous-groupes) concerne directement les scénarios de demandes finales dont certains pays ne disposent pas (le scénario de croissance sectorielle pour un pays dans lequel cette information est absente, est représenté par le scénario d'un autre pays du même sous-groupe de niveau économique et de croissance similaire).

La répartition du périmètre géographique répond à certains critères d'ordres économiques basés sur le PIB par habitant<sup>7</sup> et la croissance économique de chaque pays. Les figures ci-dessous (Figure 14) établissent ces critères de répartition (PIB/habitant = 100, Croissance économique = 6%) entre les pays.



Source : Réalisée à partir des données de la Commission Européenne 2007

**Figure 14 : Croissance économique (%) et PIB/habitant (base 100 moyenne européenne) par pays de l'UE-27**



**Figure 15 : Répartition du périmètre géographique**

Cette répartition géographique concerne uniquement les données transposables (scénarios de croissance, prix des matières premières et des énergies, évolution de la capacité résiduelle).

<sup>7</sup> Exprimé en PPA (Parité de Pouvoir d'Achat)

En effet, elle ne concerne pas la structure de l'industrie propre à chaque pays, notamment les modes de production et les caractéristiques de chaque secteur industriel (exemple : si la République Tchèque dispose d'une production d'acier par voie électrique, cela ne suppose pas que la Slovaquie possède la même filière avec une capacité de production similaire).

### 3.4. Modèle Europe : transposition du modèle France

Élargir le périmètre géographique du modèle nécessite d'avoir des données disponibles correspondant à une connaissance sectorielle approfondie avec un niveau de détail équivalent par pays. Or malheureusement, à ce niveau de détail les données sont peu abondantes. Des manques peuvent être rencontrés au sein d'un pays ou d'un secteur industriel. Ces manques concernent principalement les données relatives aux chaudières (les consommations sous chaudière ne sont pas renseignées d'une manière fine) et les données concernant la consommation des combustibles (certains combustibles ne sont pas renseignés en détail). De ce fait et pour combler ce manque de données, des approximations ont été réalisées.

Parmi les pays européens représentés dans le modèle industrie, la France est le seul pays où les données sur les IGCE sont renseignées d'une manière fine (des consommations détaillées par combustible, par chaudière et par sous-chaudière). Partant du principe que l'industrie grosse consommatrice d'énergie possède une structure de fabrication quasi-similaire d'un pays à un autre, la France sera utilisée comme référent au niveau des ratios de consommation énergétique.

Ainsi cette approche permet d'identifier par secteur industriel et par pays :

- la part des consommations énergétique sous chaudière,
- la part de la vapeur convertie par les cogénérations et les turbines pour la production d'électricité,
- la part par type de combustible consommé sous chaudière,

Le principe de la méthode est le suivant :

L'association du référent (le modèle français), de la connaissance des consommations spécifiques moyennes européennes des procédés de fabrication relatifs aux IGCE et des productions européennes de chaque produit industriel permettent de déterminer par pays et par secteur la part des consommations énergétiques consommées sous chaudière<sup>8</sup> (hors

---

<sup>8</sup> Les consommations spécifiques moyennes et les productions de chaque procédé déterminent les besoins énergétiques du procédé.

$$BesoinProc_{Energ} = ConsoEnerSpec \times ProdProc$$

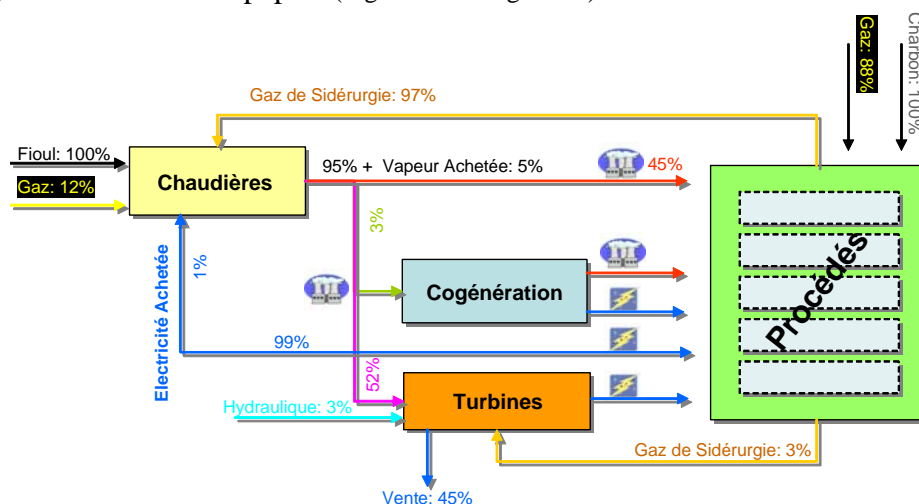
Pour un secteur donné, la consommation énergétique hors chaudière est égale à la somme des besoins énergétiques des procédés.

$$ConsoTotProc_{Sect} = \sum BesoinProc_{Energ}$$

La part des consommations énergétiques sous chaudière pour un pays est égale à la somme des besoins en vapeur des procédés de fabrication. En outre, elle représente les consommations énergétiques hors chaudière  $ConsoTotProc_{Sect}$  divisées par la part de référence (le secteur industriel en France) des consommations énergétiques hors chaudière en %, multipliées par la part des consommations énergétiques sous chaudière de référence (le secteur industriel en France).

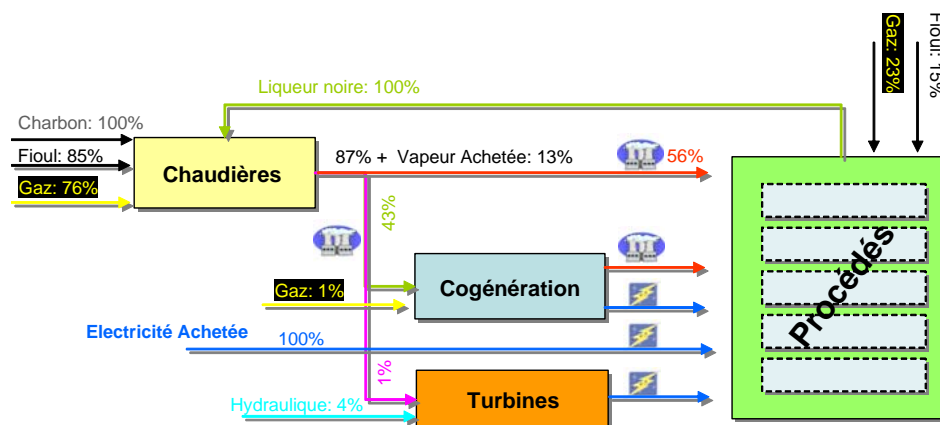
procédé).

Après le calcul des consommations énergétiques sous chaudière, celles-ci seront réparties par secteurs industriels selon des schémas de répartition d'énergie sur le même principe que la sidérurgie et l'industrie du papier (Figure 16 et Figure 17).



Réalisé à partir des données CEREN

**Figure 16 : Ratios de consommation énergétique pour le reste des pays européens à l'image de la France, dans le cas de la sidérurgie**



Réalisé à partir des données CEREN

**Figure 17 : Ratios de consommation énergétique pour le reste des pays européens à l'image de la France, dans le cas de l'industrie du papier**

Les Figure 16 et Figure 17 représentent la clé de répartition des consommations énergétiques de la sidérurgie et de l'industrie du papier pour les pays européens à l'image de la France. La sidérurgie et l'industrie du papier représentent les deux seules industries dont les consommations énergétiques sous chaudière ne sont pas négligeables.



Elle représente le système dans son état initial, c'est à dire le total des capacités installées et les niveaux de fonctionnement de toutes les technologies construites avant (opérationnelles) et durant cette année.

Dans le cadre du modèle industrie l'année de référence est l'année 2000. Toutes les technologies existantes avant et durant cette période ont été répertoriées et intégrées à cette seule année. Les décisions d'installation ou de démantèlement de 2000 à 2007 ont été prises en compte. Elles sont considérées comme données effectives et ne font pas l'objet d'optimisation.

$$CapRT_{i,2000} = \sum_i \sum_t Cap_{i,t}, \quad t = 2000$$

$CapRT_{i,2000}$  : Capacité totale de la technologie  $i$  à l'année de référence 2000

$Cap_{i,t}$  : Capacité de la technologie  $i$  à l'instant  $t$

Même si les investissements passés influencent largement les choix futurs du modèle, les investissements des technologies de l'année de référence dans le cadre du modèle industrie ont été supposés nuls<sup>9</sup>. A l'inverse, les coûts fixes et variables nécessaires pour la maintenance et le fonctionnement des technologies de production ont été pris en compte.

$$CI_{i,2000} = 0, \quad CV_{unit_i} = \frac{CV_i}{Cap_i}, \quad CF_{unit_i} = \frac{CF_i}{Cap_i}$$

$CI_{i,2000}$  : Coût d'investissement de la technologie  $i$  à l'année de référence 2000,

$CV_{unit_i}$  : Coûts variables unitaire de la technologie  $i$ ,

$CF_i$  : Coûts fixes de la technologie  $i$ ,

$CF_{unit_i}$  : Coûts fixes unitaire de la technologie  $i$ ,

$Cap_i$  : Capacité de la technologie  $i$

$CV_i$  : Coûts variables de la technologie  $i$ ,

Pour changer l'année de référence dans le modèle industrie, il ne suffit pas de changer simplement l'année. Il faut aussi changer l'ensemble des paramètres associés aux technologies de la dite année. Par exemple, si un utilisateur décide de changer l'année initiale de 2000 à 2005, il doit prendre en compte l'ensemble des nouvelles technologies construites et/ou démantelées entre 2000 et 2005.

## 4.2. Capacité résiduelle : déterminante pour le rythme de remplacement des équipements

### 4.2.1. Équipements de production à l'année de référence

Les équipements constituant l'année de référence concernent les technologies de production (produits manufacturés) et les technologies thermiques (chaleur, électricité). Dans cette partie seules les technologies de production seront exposées. Une partie sera consacrée spécialement aux technologies thermiques dans les sections qui suivent.

Les technologies de production représentent l'ensemble des étapes de production. Elles sont agrégées ou désagrégées selon les secteurs d'activité. Le tableau ci-dessous met en évidence

<sup>9</sup> On a supposé que les retours sur les investissements étaient réalisés.



l'ensemble des technologies de production prises en compte dans le modèle :

- Les industries des tuiles et des briques sont représentées par une seule technologie, chaque technologie regroupe l'ensemble des étapes de production (description agrégée). Les industries du ciment, de la chaux et du plâtre sont représentées par deux technologies (trois pour la France avec une unité de broyage et de traitement des matières premières mise à part) : une technologie de production finale, une autre intermédiaire.
- L'industrie du verre est représentée par quatre catégories de demandes finales : verre creux (voie normale, voie recyclée), verre plat, fibres de verre, verres spéciaux.
- L'industrie de la céramique avec trois catégories de demandes finales : carreaux en céramique, réfractaires et produits spéciaux en céramique.
- L'industrie du plâtre est représentée par le plâtre et le plâtre pour la construction.
- L'industrie du papier est représentée par une technologie de production du papier et trois technologies de production de la pâte à papier (chimique, mécanique et à base du papier recyclé).
- La sidérurgie est représentée par deux filières de production d'acier : la filière fonte et la filière électrique. Dans le cas de la filière fonte, l'ensemble des ateliers associés à cette filière est représenté : la cokerie, l'agglomération, le haut fourneau, le convertisseur à oxygène, la métallurgie secondaire, la coulée continue, le laminage à chaud (laminage à froid et finition pour la France).

Secteur	Code	Description
<b>Plâtre</b>	IGPPPRO00	IPL. Gypsum production Processes.00.
	IPLSHYPRO00	IPL. Semi-hydrate Production Processs.00.
<b>Tuiles</b>	ITLPRPRO00	ITL. Tiles production Processes.00.
<b>Céramique</b>	ICRCPRPRO00	ICR. Ceramics Sqr. Production Processes.00.
	ICRSPRPRO00	ICR. Ceramics Spc. Production Processes.00.
	ICRRPRPRO00	ICR. Ceramics Ref. Production Processes.00.
<b>Briques</b>	IBRKPRPRO00	IBR. Brick Production Processes.00.
<b>Chaux</b>	ILMPPRO00	ILM. Lime production Processes.00.
	ILMQLMPPRO00	ILM. Quicklime Production Processs.00.
<b>Verre</b>	IGHHOLLOW00	IGH. Glass Hollow Processes.00.
	IGHRCYGH00	IGH. Recycled Glass Hollow Processes.00.
	IGFFLATGL00	IGF. Glass Flat Processes.00.
	IGFFIBRGL00	IGH. Glass Fibers Processes.00.
	IGSPCRGL00	IGH. Specials Glass Processes.00.
<b>Ciment</b>	ICMPPRO00	ICM. Cement production Processes.00.
	IDCLKPPRO00	ICM. Dry Clinker production Processs.00.
<b>Pâte &amp; papier</b>	IPPPRPRO00	IPP. Paper Processes.00.
	ICHPLPPRO00	IPP. Chemical Pulp Processs.00.
	IMCPLPPRO00	IPP. Mechanical Pulp Processs.00.
	IRCYPLPPRO00	IPP. Recycled Pulp Processs.00.
<b>Sidérurgie</b>	IISHRPRO00	IIS. Hot Rolling Processes.00.
	IISCCPRO00	IIS. Continuous Casting Processes.00.
	IISCMETPRO00	IIS. Secondary Metallurgy Processes.00.

	IISBOXFURPRO00	IIS. Blast Oxygen Furnace BOF Process.00.
	IISBLAFURPRO00	IIS. Iron Blast Furnace Process.00.
	IISNTRPRO00	IIS. Sinter Production Process.00.
	IISCOKOVPRO00	IIS. Coke Oven Process.00.
	IISEARCFURPRO00	IIS. Electric Arc Furnace EAF Process.00.

**Tableau 1 : Les équipements de l'année de référence**

Trois secteurs d'activité sont représentés par des filières de production à base de produits recyclés : le papier, le verre et la sidérurgie.

Une fois collectés et triés (la collecte et le tri ne sont pas étudiés dans le modèle), l'ensemble des produits (papier, verre et acier arrivés en fin de vie) représentent une matière première qui reste réutilisable pour la fabrication de nouveaux produits.

Grâce au recyclage, l'industrie contribue à la réduction des consommations énergétiques et à une meilleure gestion des déchets, ce qui va dans le sens du respect de l'environnement et du développement durable.

Les produits en papier et en carton sont, pour la quasi-totalité d'entre eux, recyclables. Il s'agit du seul mode de valorisation permettant le réemploi de la matière fibreuse. Après usage, le verre d'emballage est transformé en calcin pour être recyclé dans les fours verriers, où il servira à produire de nouveaux emballages<sup>10</sup>. Par ailleurs, le recyclage de l'acier a été développé et organisé par les sidérurgistes. L'acier est un matériau indéfiniment recyclable.

En Europe, le taux de recyclage est très variable, il représente en moyenne 59% du verre consommé et 56% pour le papier. Le recyclage de l'acier représente 39% du total acier produit. Les figures ci-dessous illustrent les disparités des taux de recyclage dans les pays européens. Les parts de recyclage sont représentées dans le modèle de manière à considérer la part de recyclage pour chaque pays européen.

---

<sup>10</sup> Les verres spéciaux sont difficiles à recycler, voir impossible. La seule limite au recyclage est la couleur, les verres de couleur ne peuvent refaire que des verres de couleur, un tri complémentaire permettra bientôt de séparer le verre de couleur du verre incolore, ce qui permettra la fabrication de nouveaux emballages de teinte claire.

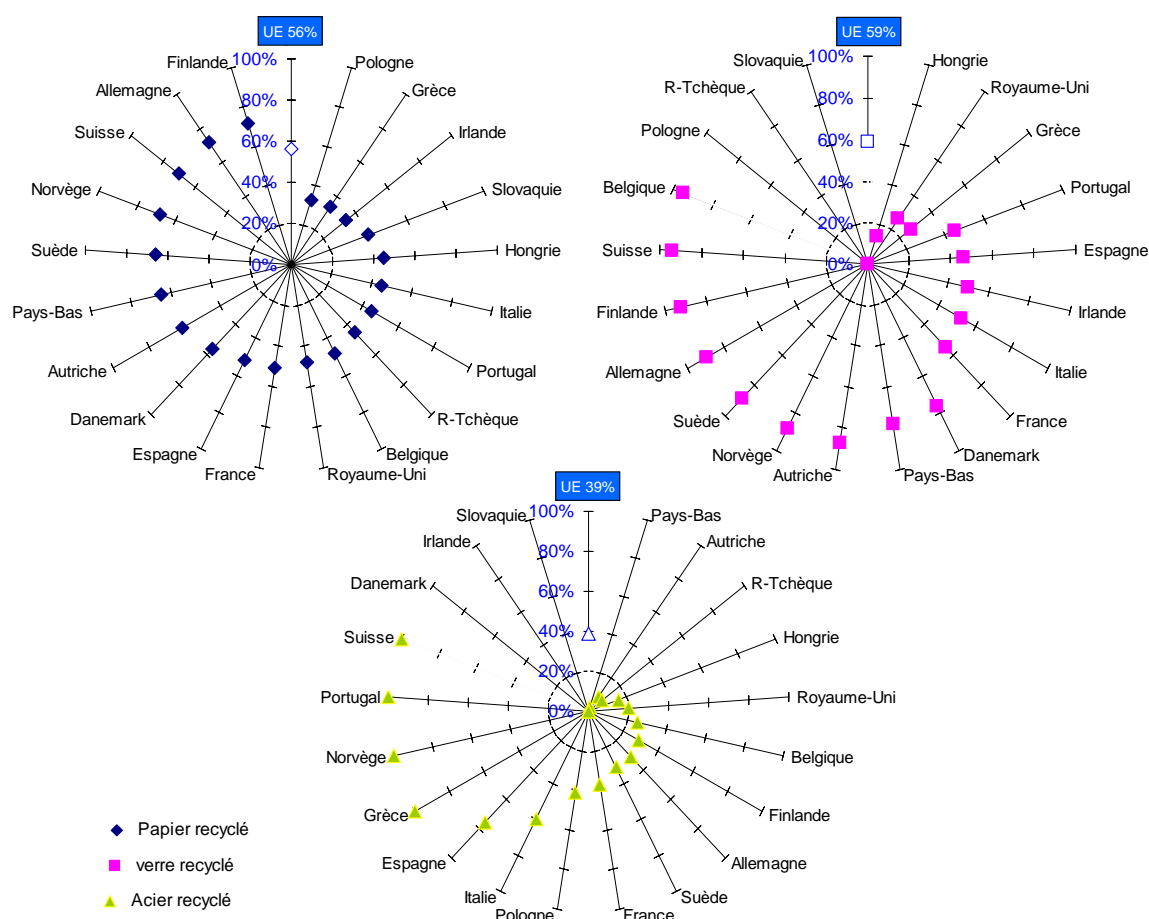


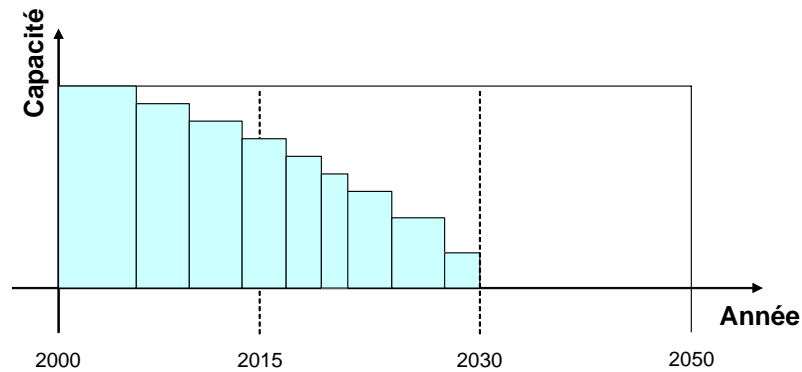
Figure 19 : Taux de recyclage dans l'industrie

#### 4.2.2. La durée de vie des équipements n'est pas toujours fixe

La capacité résiduelle à l'année de référence n'est pas constante sur l'ensemble de l'horizon de temps. Sa variation dépend de l'historique (année d'installation) et de la durée de vie des technologies de production. Ces deux critères peuvent être variables d'un pays à un autre et d'un secteur à un autre. A la fin de la durée de vie de la dernière capacité installée, la capacité résiduelle s'annule et une nouvelle capacité sera installée.

Dans le cadre du modèle industrie on suppose que la dernière capacité installée a eu lieu à l'année de référence. Pour une durée de vie moyenne de 30 ans (à l'exception de la sidérurgie), la capacité résiduelle s'annule en 2030 (

Figure 20). Dans le cadre de la sidérurgie, la technique de revamping (remise en état de la technologie) permet d'allonger la durée de vie de la technologie.



**Figure 20 : Représentation de la variation de la capacité résiduelle**

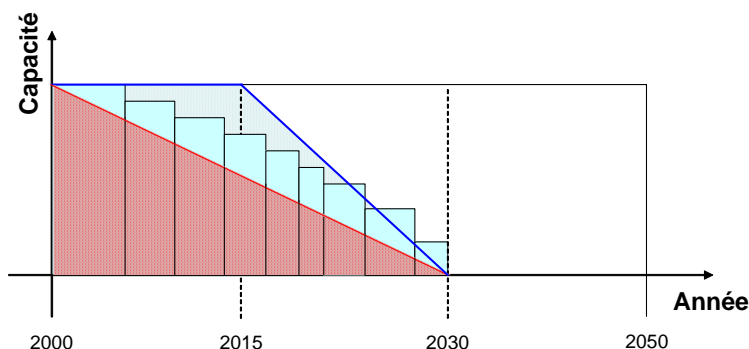
#### 4.2.3. Durée de vie de la capacité résiduelle : une approche par zone géographique

L'absence de données sur l'année de construction des technologies représentant la capacité résiduelle nous a conduit à élaborer certaines hypothèses (voir section 3.3 Pallier à l'absence de données : le regroupement géographique). En premier lieu, les pays européens sont répartis en deux groupes :

- **A** : les pays de l'UE-15, la Norvège et la Suisse ;
- **B** : le reste de l'Europe des 27.

Pour le groupe A : on considère, du fait du niveau économique et technique élevé de ces pays, que des améliorations ont d'ores et déjà été réalisées sur les technologies existantes (moins de restructuration). Par conséquent, leur durée de vie est prolongée. Donc on suppose que la capacité résiduelle reste constante jusqu'à 2015 (l'âge moyen des technologies existantes varie selon les secteurs de 15 à 18 ans), puis devient dégressive linéairement pour s'annuler en 2030 (30 ans durée de vie standard des nouvelles technologies) (voir l'aire bleue Figure 21).

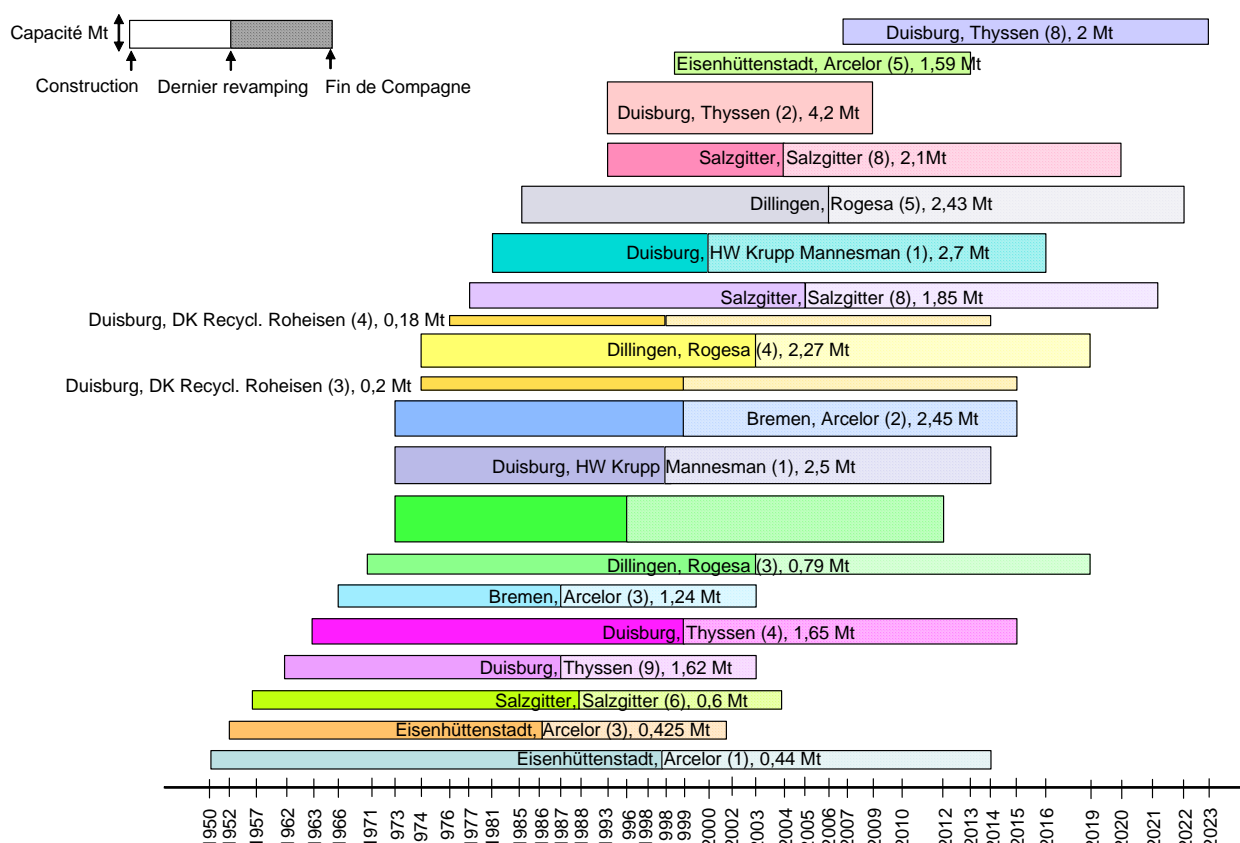
Pour le groupe B : on suppose une forte restructuration des technologies de production existantes (soumises aux normes Européennes). Par conséquent, on pose l'hypothèse que la durée de vie de la capacité résiduelle décroît linéairement à partir de 2000, pour s'annuler en 2030 (voir l'aire rouge Figure 21).



**Figure 21 : Représentation de la durée de vie de la capacité résiduelle**

#### 4.2.4. Comment gérer « le revamping », le remplacement partiel des équipements

Caractérisée par des durées de campagne de 12 à 16 ans, la technique de revamping (de l'anglais revamp : retaper ou réfection) consiste en la remise en état des installations existantes, l'accompagnement des progrès techniques (amélioration de l'injection de charbon dans le haut fourneau), la garantie des évolutions en matière de la protection de l'environnement.

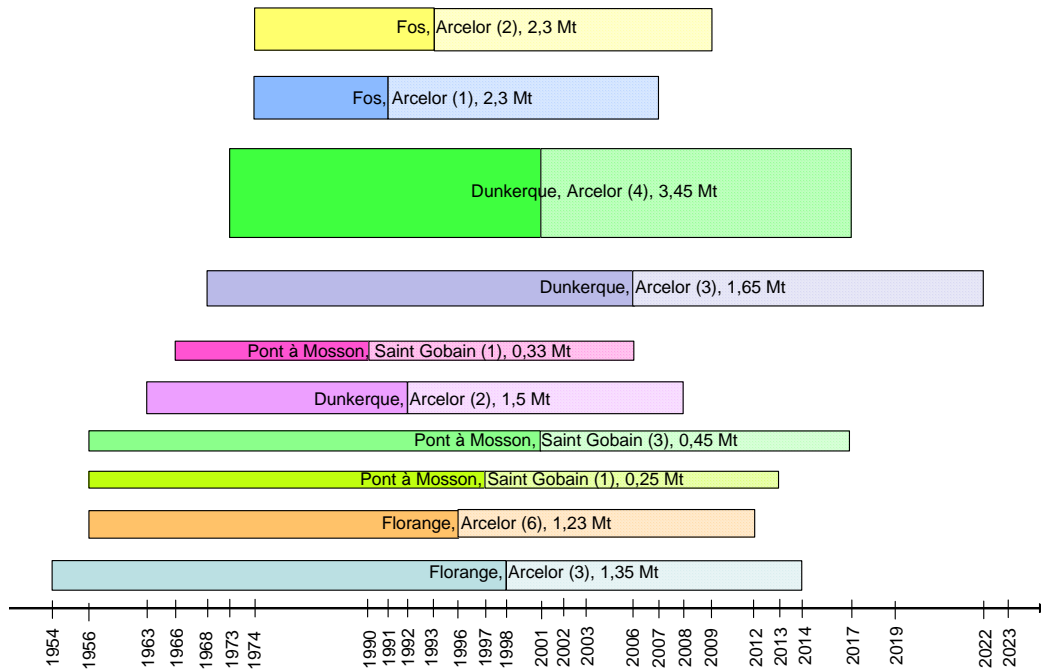


**Figure 22 : Structure de la capacité résiduelle pour la sidérurgie en Allemagne**

A la lecture des graphes (

Figure 22 et Figure 23), on constate qu'une installation construite en 1952 demeure opérationnelle jusqu'à nos jours, soit une durée de vie supérieure à 50 ans, ce qui dépasse largement la durée de vie moyenne estimée à 25 ans pour un haut fourneau.

En effet, certaines installations peuvent subir plusieurs revamping tout au long de leur durée de vie, et cela est très variable par installation et par site de production. A l'année de démarrage du dernier revamping, certaines technologies n'ont eu recours à aucun revamping et d'autres à un, voire deux ; cela explique leur durée de vie plus ou moins longue.



**Figure 23 : Structure de la capacité résiduelle pour la sidérurgie en France**

Cette particularité de l'industrie sidérurgique donne une autre dimension à la durée de vie de la capacité résiduelle. Par conséquent, elle a permis de poser un certains nombres d'hypothèses :

#### 4.2.4.1. La capacité résiduelle connue

Dans le cas où les années de construction pour un pays sont connues (Allemagne, Autriche, Belgique, Espagne, France, Italie, Pays-Bas, Royaume-Uni), l'évolution de la capacité résiduelle est représentée par quatre paliers<sup>11</sup> (1, 2, 3, 4) :

- le premier palier suppose que toutes les technologies construites avant 1970 restent opérationnelles jusqu'à 2015. A ce niveau, la capacité résiduelle totale ( $CapRT$ ) est égale à la somme des capacités ( $Cap_t$ ) de toutes les technologies construites avant et durant 2000 et qui restent opérationnelles en 2015 (à l'exception des nouveaux investissements réalisés après 2000).

$$CapRT_{2015} = CapRT_{2000} = \sum_t Cap_t, \quad t=2015$$

- le second palier suppose que toutes les technologies construites entre 1970 et 1980 restent opérationnelles jusqu'à 2030. A ce niveau, la capacité résiduelle totale ( $CapRT$ ) est égale à la somme des capacités ( $Cap_t$ ) de toutes les technologies construites avant et durant 2000 et qui restent opérationnelles en 2030 (à l'exception des nouveaux investissements réalisés après 2000).

$$CapRT_{2030} = \sum_t Cap_t, \quad 2015 < t \leq 2030$$

<sup>11</sup> Chaque palier représente une durée de vie moyenne de 50 à 60 ans. Au-delà on considère que les technologies doivent être remplacées.

- le troisième palier suppose que toutes les technologies construites entre 1980 et 1990 restent opérationnelles jusqu'à 2040. A ce niveau la capacité résiduelle totale ( $CapRT$ ) égale à la somme des capacités ( $Cap_t$ ) de toutes les technologies construites avant et durant 2000 et qui restent opérationnelles en 2040 (à l'exception des nouveaux investissements réalisés après 2000).

$$CapRT_{2040} = \sum_t Cap_t, \quad 2030 < t \leq 2040$$

- au-delà de 1990 (le quatrième palier), les technologies construites restent opérationnelles jusqu'à 2050. A ce niveau, la capacité résiduelle totale ( $CapRT$ ) est égale à la somme des capacités ( $Cap_t$ ) de toutes les technologies construites avant et durant 2000 et qui restent opérationnelles en 2050 (à l'exception des nouveaux investissements réalisés après 2000).

$$CapRT_{2050} = \sum_t Cap_t, \quad 2040 < t \leq 2050$$

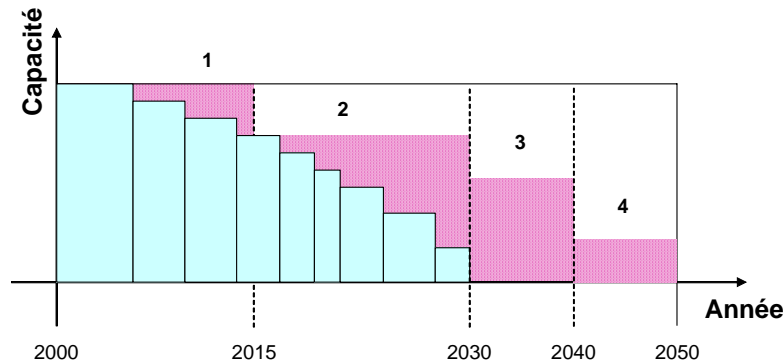


Figure 24 : Évolution de la capacité résiduelle

#### 4.2.4.2. La capacité résiduelle inconnue

Dans ce cas de figure (reste des pays européen), on suppose que la capacité résiduelle reste opérationnelle jusqu'à 2025, et décroît linéairement pour s'annuler en 2050 (Figure 25).

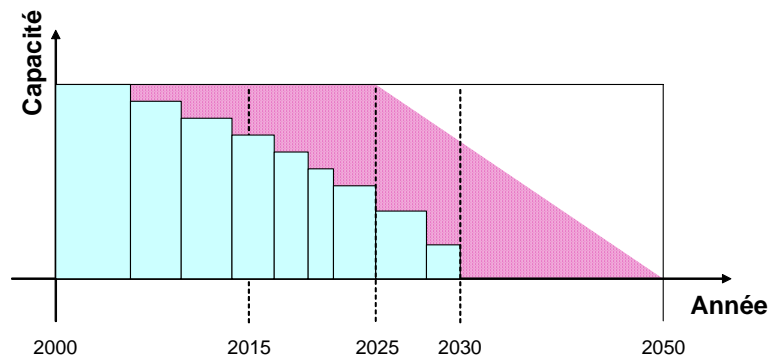


Figure 25 : Évolution de la capacité résiduelle

### 4.3. Base des nouvelles technologies : un élément

## déterminant

Les nouvelles technologies disponibles pour de nouveaux investissements de production cernent l'ensemble des ajustements et des substitutions possibles par leurs réactions aux scénarios de demande, de coûts, et aux éventuelles taxes. Elles sont différenciées par technologie, par secteur (niveau de détail) et par pays.

Chaque technologie de cette base est caractérisée par des paramètres économiques (coûts d'investissements, coûts de maintenance et de fonctionnement), et de paramètres techniques (consommations d'énergie, consommations de matières premières, rendement, disponibilité de fonctionnement et millésime de disponibilité).

Le caractère transposable de ces technologies a permis une description quasi similaire pour tous les pays européens. Néanmoins, certaines spécificités nationales des technologies ont été considérées (exemple : le taux d'utilisation des spéciaux dans les fours à clinker est différent selon les pays).

Les nouvelles technologies doivent couvrir l'ensemble des étapes de production représentées dans l'année de référence, avec une ou plusieurs technologies candidates pour chaque étape.

Les technologies retenues sont réparties en trois classes :

- technologies révolutionnaires (innovantes ou de rupture), assurant les mêmes tâches que les technologies existantes (technologies répertoriées à l'année de référence) avec des caractéristiques technico-économiques totalement différentes.
- technologies identiques aux technologies existantes (conventionnelles) avec les mêmes caractéristiques techniques et économiques (le modèle a la possibilité de les choisir comme nouvel investissement).
- technologies identiques aux technologies existantes avec des améliorations en terme d'efficacité énergétique (MDE, exemple : améliorations sur les moteurs, réduction de la part du coke dans le haut fourneau).

L'ensemble de ces technologies<sup>12</sup> ainsi que les produits utilisés pour la production d'énergie, les matières premières importées ou transformées, sont décrites par des codes pour faciliter la gestion et l'analyse des résultats.

- Les technologies de production sont identifiées par une série de lettres inférieure à 15<sup>13</sup> les premières lettres indiquent le secteur d'activité spécifique à la technologie (exemple : « **IP** » pour l'industrie du papier, « **ICM** » pour l'industrie du ciment) le reste des lettres indique le type de la technologie ou le produit associé (exemple : « **ICMHEC** » Industrie du ciment High Efficient Classifier et « **PRO** » pour Procédé). Les chiffres « **00** » indiquent les technologies existantes (les technologies de l'année de référence). « **01** » les nouvelles technologies. Dans le cas où des améliorations sont effectuées sur le même type de technologie ce chiffre peut croître selon le nombre d'améliorations identifiées sur le procédé « **02** » ou « **03** »... Les technologies à hydrogène sont identifiées par « **HYD** » et les technologies de stockage et de séquestration de CO<sub>2</sub> par « **CCS** ».

<sup>12</sup> Une même approche de nomenclature a été accordée aux technologies de l'année de référence

<sup>13</sup> Au-delà des 15 lettres le modèle ne fonctionne pas (aspect spécifique au modèle TIMES)



- Les vecteurs énergétiques sont aussi définis par une série de lettres qui représentent une abréviation du combustible « **FOL** » pour le fioul et « **GASNAT** » pour le Gaz naturel.
- Les sources d'approvisionnement sont identifiées par « **IMP** » pour les importations ou « **MIN** » pour les mines ou les réserves.

Secteur	Code	Description	Conventionnelle	MDE	Innovante
Papier	IPCNVPPRO01	IPP. Conventional Paper Process.01.	X		
	IPCNVPPRO02	IPP. Conventional Paper Process.02.	X		
	IPCNVPPRO03	IPP. Conventional Paper Process.03.	X		
	IPCHPLPRO01	IPP. Chemical Pulp Process.01.	X		
	IPCHPLPRO02	IPP. Chemical Pulp Process.02.	X		
	IPMCPLPRO01	IPP. Mechanical Pulp Process.01.	X		
	IPNRCYPLPRO01	IPP. New Recycled Pulp Process.01.	X		
	IPCNVPADPRO01	IPP. Conventional Paper Adv Drives Process.01.		X	
	IPCNVPADPRO02	IPP. Conventional Paper Adv Drives Process.02.		X	
	IPCNVADPPRO03	IPP. Conventional Paper Adv Drives Process.03.		X	
	IPCNVADPPRO04	IPP. Conventional Paper Adv Drives Process.04.		X	
	IPASPSPRO01	IPP. Ameliorate Press Section Paper Process.01.		X	
	IPASPADPRO01	IPP. Ameliorate Press Section Paper Drives Process.01.		X	
	IPCOHPPRO01	IPP. Closing of Hoods Paper Process.01.		X	
	IPCOHPPADPRO01	IPP. Closing of Hoods Paper Drives Process.01.		X	
	IPOODPPRO01	IPP. Optimization of Drying Paper Process.01.		X	
	IPOODADPPRO01	IPP. Optimization of Drying Paper Drives Process.01.		X	
	IPPDRPADPRO01	IPP. Press Drying Paper Adv Drives Process.01.		X	
	IPCBDPADPRO01	IPP. Condensing Belt Dryer Paper Drives Process.01.		X	
	IPIDRPADPRO01	IPP. Impulse Dryer Paper Drives Process.01.		X	
	IPAIDPADPRO01	IPP. Air Impingement Drying Paper Drives Process.01.		X	
	IPSIDPADPRO01	IPP. Steam Impingement Drying Paper Drives Process.01.		X	
	IPADRPADPRO01	IPP. Airless Drying Paper Drives Process.01.		X	
	IPCHPLPOPRO01	IPP. OP Chemical Pulp Process.01.		X	
	IPCTMPLPRO01	IPP. Chemical-Thermo mechanical Pulp Process.01.		X	
	IPTMPLPRO01	IPP. Thermo- Mechanical Pulp Process.01.		X	
	IPNARCYPLPARO01	IPP. New Improved Recycled Pulp Process.01.		X	
	IPNARCYPLPARO02	IPP. New Improved Recycled Pulp Process.02.		X	
	IPPDRPPRO01	IPP. Press Drying Paper Process.01.			X
	IPCBDPPO01	IPP. Condensing Belt Dryer Paper Process.01.			X
	IPIDRPPRO01	IPP. Impulse Dryer Paper Process.01.			X
	IPAIDPPRO01	IPP. Air Impingement Drying Paper Process.01.			X
	IPSIDPPRO01	IPP. Steam Impingement Drying Paper Process.01.			X
	IPADRPPRO01	IPP. Airless Drying Paper Process.01.			X
	IPBIOPLPRO01	IPP. Bio- Mechanical Pulp Process.10			X
	IPBIOPLPRO01	IPP. Bio- Mechanical Pulp Process.20			X
	IPENZPLPRO01	IPP. Enzyme- Mechanical Pulp Process.10			X
	IPDSFPRO01	IPP. Dry Sheet Forming Process.20.			X
	IPERTSPLPRO01	IPP. RTS- Mechanical Pulp Process.10			X
	IPETHPLPRO01	IPP. Thermo pulp- Mechanical Pulp Process.10			X

Tableau 2 : Technologies modélisées pour l'industrie du papier

Secteur	Code	Description	Conventionnelle	MDE	Innovante
<b>Ciment</b>	ICMNCNVPPRO01	ICM. New Conventional Cement Production Process.01.	X		
	ICLKNCPPRO01	ICM. New Conv. Dry Clinker Production Process.01.	X		
	ICMNACNVPPRO01	ICM. New Improved Conv Cement Production Process.01.		X	
	ICMNACNVPPRO02	ICM. New Improved Conv Cement Production Process.02.		X	
	ICMHRPPRO01	ICM. H. Pressure Cement Production Process.01.		X	
	ICMHECPPRO01	ICM. H. Eff. Classifiers Cement Production Process.01.		X	
	ICLKEMCSPPRO01	ICM. E.M. Control Sys. Clinker Production Process.01.		X	
	ICLKICSPRO01	ICM. Imp Comb Sys Clinker Production Process.01.		X	
	ICLKASDPRO01	ICM. Adv Speed Drvs Clinker Production Process.01.		X	
	ICLKOHRSPPRO01	ICM. Optim Heat Recov Clinker Production Process.01.		X	
	ICLKHRPPRO01	ICM. High Press Roll Clinker Production Process.01.		X	
	ICLKHECPRO01	ICM. High Eff Classif Clinker Production Process.01.		X	
	ICLKSPRO01	ICM. R. Kiln Preheater Clinker Production Process.01.			X
	ICLKSPPPRO01	ICM. Preh. Precal Clinker Production Process.01.			X
	ICLKSSCPPRO01	ICM. SSC Preh. Precal Clinker Production Process.01.			X
	ICLKMSPPRO01	ICM. Multi-Stage Preheat Clinker Production Process.01.			X
	ICLKFBPPRO01	ICM. Fluidized Bed Clinker Production Process.01.			X
<b>Chaux</b>	ILNCLMPPRO01	ILM. New Conv. Lime Production Process.01.	X		
	ILNCQLMPPRO01	ILM. New Conv. Quicklime Production Process.01.	X		
	ILNACLMPRO01	ILM. New Impro Conv. Lime Production Process.01.		X	
	ILNACLMPRO02	ILM. New Impro Conv. Lime Production Process.02.		X	
	ILHERMLMPRO01	ILM. H. Eff Roller Lime production Process.01.		X	
	ILHECLMPPRO01	ILM. H. Eff. Classifiers Lime Production Process.01.		X	
	ILASDLMPRO01	ILM. ASD. Lime production Process.01.		X	
	ILMFSKQLMPPRO01	ILM. Mix Feed Shaft K. Quicklime Production Process.01.			X
	ILDISKQLMPPRO01	ILM. Dbl. Inclined Shaft K. Quicklime Production Process.01.			X
	ILMCSKQLMPPRO01	ILM. Multi Chmbr Shaft K. Quicklime Production Process.01.			X
	ILASKQLMPPRO01	ILM. Anlr Shaft K. Quicklime Production Process.01.			X
	IPRSKQLMPPRO01	ILM. Prll. Reg. Shaft K. Quicklime Production Process.01.			X
<b>Plâtre</b>	IGPNCPPRO01	IPL. Gypsum New Conv. Production Process.01.	X		
	IPLSHYNCPPRO01	IPL. Semi-hydrate New Conv. Production Process.01.	X		
	IGPANCPRO01	IPL. Gypsum Impro. New Conv. Production Process.01.		X	
	IGPANCPRO02	IPL. Gypsum Impro. New Conv. Production Process.02.		X	
	IPLSHYANCPRO01	IPL. Semi-hydrate Impro. New Conv. Production Process.01.		X	
	IPLSHYANCPRO02	IPL. Semi-hydrate Impro. New Conv. Production Process.02.		X	

Tableau 3 : Technologies modélisées pour les matériaux de construction<sup>14</sup>

Secteur	Code	Description	Conventionnelle	MDE	Innovante
<b>Tuiles</b>	ITLNCPPRO01	ITL. Tiles New Conv Production Process.01.	X		
	ITLANCPRO01	ITL. Tiles Impro. New Conv Production Process.01.		X	
	ITLANCPRO02	ITL. Tiles Impro. New Conv Production Process.02.		X	
<b>Céramique</b>	ICRCNCPRO01	ICR. Ceramics Sqr. NC Production Process.01.	X		
	ICRSNCPRO01	ICR. Ceramics Spc. NC Production Process.01.	X		
	ICRRNCPRO01	ICR. Ceramics Ref. NC Production Process.01.	X		

<sup>14</sup> La technique à lit fluidisé dans le four à clinker n'est pas prise en compte par manque de données économiques (investissement)

<b>Briques</b>	ICRCANCPRO01	ICR. Ceramics Sqr. Impro. Production Process.01.		X	
	ICRCANCPRO02	ICR. Ceramics Sqr. Impro. Production Process.02.		X	
	ICRSANCPRO01	ICR. Ceramics Sqr. Improv. Production Process.01.		X	
	ICRSANCPRO02	ICR. Ceramics Sqr. Improv. Production Process.02.		X	
	ICRRANPRO01	ICR. Ceramics Ref. Improv. Production Process.01.		X	
	ICRRANPRO02	ICR. Ceramics Ref. Improv. Production Process.02.		X	
	IBRKNCPRO01	IBR. Brick NC Production Processes.01.	X		
	IBRKANCPRO01	IBR. Brick Improv. NC Production Process.01.		X	
	IBRKANCPRO02	IBR. Brick Improv. NC Production Process.02.		X	

**Tableau 4 : Technologies modélisées pour les autres matériaux de construction**

Secteur	Code	Description	Conventionnelle	MDE	Innovante
<b>Sidérurgie</b>	ISHRNCPRO01	IIS. Hot Rolling New Conv. Process .01.	X		
	ISHRGNCPRO01	IIS. Hot Rolling Gas New Conv. Process .01.	X		
	ISSTLCCPRO01	IIS. New Continuous Casting Process.01.	X		
	ISSCMETPRO01	IIS. New Secondary Metallurgy Process.01.	X		
	ISBOXFURPRO01	IIS. New Blast Oxygen Furnace BOF.Process.01.	X		
	ISEARCFURPRO01	IIS.New Electric Arc Furnace EAF.Process.01.	X		
	ISBLAFURPRO01	IIS.Iron Blast Furnace Process.01.	X		
	ISSNTRPRO01	IIS.Sinter Production Process.01.	X		
	ISCOKOVPRO01	IIS.Coke Oven Process.01.	X		
	ISHRANCPRO01	IIS. Hot Rolling Improved New Conv. Process .01.		X	
	ISHRANCPRO02	IIS. Hot Rolling Impro New Conv. Process .02.		X	
	ISHRAGNCPRO01	IIS. Hot Rolling Impro Gas New Conv. Process .01.		X	
	ISHRAGNCPRO02	IIS. Hot Rolling Impro Gas New Conv. Process .02.		X	
	ISSTLACCPRO01	IIS. New Impro Continuous Casting Process.01.		X	
	ISSTLACCPRO02	IIS. New Impro Continuous Casting Process.02.		X	
	ISSCMETAPRO01	IIS. New Secondary Metallurgy Impro Process.01.		X	
	ISSCMETAPRO02	IIS. New Secondary Metallurgy Impro Process.02.		X	
	ISBOXFURAPRO01	IIS. New Blast Oxygen Furnace BOF Impro Process.01.		X	
	ISBOXFURAPRO02	IIS. New Blast Oxygen Furnace BOF.Impro Process.02.		X	
	ISBOXFURSCR01	IIS. New Blast Oxygen Furnace Scrap.Process.01.		X	
	ISCCSBFPRO01	IIS.Iron Blast Furnace Process with CCS.01.		X	
	ISDCIBFPRO01	IIS.Iron Blast Furnace Direct Coal Injection Process.01.		X	
	ISSNTRAPRO01	IIS.Sinter Production Impro Process.01.		X	
	ISSNTRAPRO02	IIS.Sinter Production Impro Process.02.		X	
	ISCOKOVAPRO01	IIS.Coke Oven Amel Process.01.		X	
	ISCOKOVAPRO02	IIS.Coke Oven Impro Process.02.		X	
	ISTSCSTLPRO01	IIS. Thin Slab Casting Process .01.			X
	ISSCSTLPRO01	IIS. Strip Casting Process .01.			X
	ISHSMITPRO01	IIS.Iron HIs melt Process.01.			X
	ISCOREXPRO01	IIS.Iron COREX Process.01.			X
	ISCCFURPRO01	IIS.Iron Cyclone Convertor Furnace Process .01.			X
	ISCUPLAPRO01	IIS.Cast Iron Cupola Process.01.			X
	ISELTHYDPRO01	IIS.DRI Electrolytic Hydrogen Process.01.			X
	ISDRIEHPRO01	IIS. Electrolytic Hydrogen for DRI Process. 01			X
	ISSTRFHYDPRO01	IIS.DRI Steam Reforming Hydrogen Process.01.			X
	ISDRISRHPRO01	IIS. Steam Reforming Hydrogen for DRI Process. 01			X
	ISDRISRHCSP01	IIS. Steam Reforming Hydrogen for DRI w CCS Process. 01			X
	ISCMLTEAFPRO01	IIS. Comelt Electric Arc Furnace Process .01.			X
	ISCNTEAFPRO01	IIS. Contiar Electric Arc Furnace Process .01.			X

ISMDRXPRO01	IIS. MIDREX DRI Process .02.			<b>X</b>
ISALKELYSPO01	IIS. Alkaline Electrolysis Process .01.			<b>X</b>
ISPYRELYSPO01	IIS. Pyroelectrolysis Process.01.			<b>X</b>
ISHYLPRO01	IIS. HYL III DRI Process .02.			<b>X</b>
ISEOSSNTRPRO02	IIS. EOS Sinter Production Process.01.			<b>X</b>
ISCOKDQPRO01	IIS.Coke Dry Quenching Production Process.01.			<b>X</b>

**Tableau 5 : Technologies modélisées pour la sidérurgie**

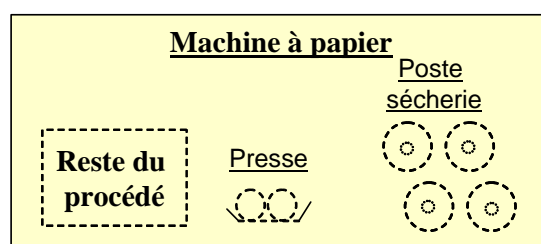
Secteur	Code	Description	Conventionnelle	MDE	Innovante
<b>Verre</b>	IGHHOLLOWNC01	IGH. NC Glass Hollow Process.01.	<b>X</b>		
	IGHHOLLOWNC02	IGH. NC Glass Hollow Process.02.	<b>X</b>		
	IGHRCYHPRO01	IGH. NC Recycled Glass Hollow Process.01.	<b>X</b>		
	IGHRCYHPRO02	IGH. NC Recycled Glass Hollow Process.02.	<b>X</b>		
	IGFFLATNCPRO01	IGF.NC Glass Flat Process.01.	<b>X</b>		
	IGFFLATNCPRO02	IGF.NC Glass Flat Process.02.	<b>X</b>		
	IGFFIBRGL01	IGH. NC Glass Fibers Process.01.	<b>X</b>		
	INGNGSPCRGL01	IGH. NC Specials Glass Process.01.	<b>X</b>		
	IGHHOLLOWIB01	IGH. NC Improved Burners Glass Hollow Process.01.		<b>X</b>	
	IGHRCYHIMPRO01	IGH. Improv. Melting Recycled Glass Hollow Process.01.		<b>X</b>	
	IGFFLATIBPRO01	IGF. Improved Burners Glass Flat Process.01.		<b>X</b>	
	IGFFIBRGLI01	IGH. NC improved Glass Fibers Process.01.		<b>X</b>	
	IGFFIBRGLI02	IGH. NC improved Glass Fibers Process.02.		<b>X</b>	
	INGNGSPCRGLI01	IGH. NC Improv. Specials Glass Process.01.		<b>X</b>	
	INGNGSPCRGLI02	IGH. NC Improv. Specials Glass Process.02.		<b>X</b>	

**Tableau 6 : Technologies modélisées pour l'industrie du verre**

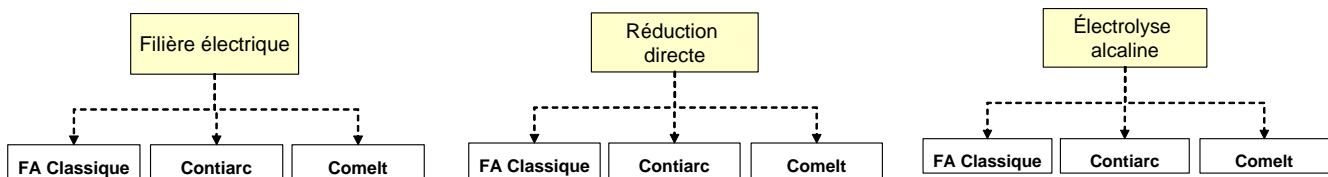
Les particularités de représentation des nouvelles technologies assurent une structure flexible et adéquate pour une meilleure représentation de l'industrie. Ces particularités sont distinctes d'un secteur à un autre :

- Dans l'industrie du papier, la représentation de la technologie de production de papier n'assure pas une description désagrégeant l'ensemble des unités de la chaîne de production. Par conséquent, les nouvelles technologies sont représentées comme étant un seul agrégat (une seule boîte) avec des hypothèses de changement au niveau des unités les plus consommatrices d'énergie notamment les presses et les sécheries.

De ce fait, plusieurs technologies ont été considérées avec un mix énergétique différent et des investissements supplémentaires relatifs aux types de presses et de séchoirs avec lesquels la technologie de production du papier est équipée.

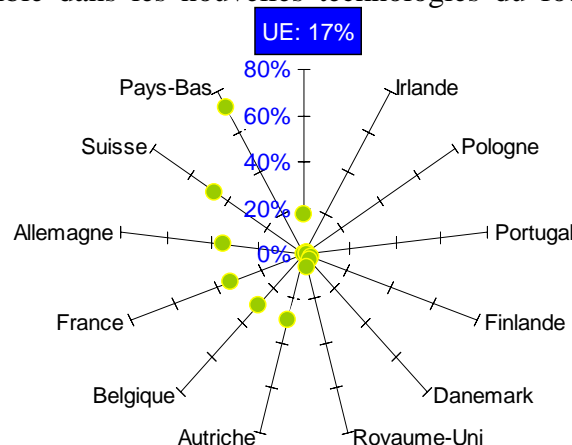
**Figure 26 : Schéma sommaire d'une machine à papier**

- L'industrie sidérurgique met en concurrence six filières différentes de production d'acier : les 2 filières historiques (filière fonte et électrique (four à arc)), la réduction directe, la réduction fusion, l'électrolyse alcaline et la pyroélectrolyse. Parmi les filières historiques, le four à arc représente la seconde filière de production d'acier en Europe, soit 1/3 de la production totale (2/3 pour l'Espagne et l'Italie) [Eurofer]. Son propre usage n'est pas limité à la seule production d'acier à base de ferraille. Il est aussi utilisé dans la réduction directe et l'électrolyse alcaline. Par conséquent, les trois nouvelles technologies concurrentes du four arc (four à arc classique, le comelt et le contiarc) sont représentées pour chacune de ces filières (Figure 27).



**Figure 27: Représentation du four à arc dans le modèle industrie**

Dans la représentation de l'industrie du ciment, une particularité a été accordée à la consommation des spéciaux dans les fours à clinker. Ces derniers représentent des parts très variables dans les pays européens et leur consommation détermine les parts des autres combustibles notamment le charbon et le coke de pétrole. Cependant, la répartition des parts de chaque combustible dans les nouvelles technologies du four à clinker est spécifique à chaque pays.



**Figure 28 : Part des spéciaux dans la consommation totale des combustibles dans l'industrie du ciment**

Comme pour l'année de référence, les technologies de production à base de produits recyclés dans l'industrie (Voir section 4.2.1) sont représentées dans les nouvelles technologies avec des améliorations au niveau des moteurs en termes d'efficacité énergétique. Même avec une certitude sur la possibilité de croissance de la part du recyclage dans l'industrie, les taux de recyclage sont considérés comme étant constants sur l'ensemble de l'horizon de temps du modèle. Le principe de cette hypothèse est fondé sur l'incertitude concernant l'évolution exacte du taux de recyclage par pays (une particularité a été accordée à la France où l'évolution des taux de recyclage est renseignée).

Néanmoins, une certaine flexibilité est accordée au modèle dans les choix technologiques avec des restrictions sur l'approvisionnement en produits à recycler (exemple : le cas de la ferraille dans la sidérurgie, voir la section 4.4 Approvisionnement en énergie et matières premières : influence sur les choix d'investissement).

Le stockage et la séquestration de CO<sub>2</sub> est une technique encore au stade du développement, dont les coûts restent considérables. Plusieurs technologies sont représentées dans le modèle :

- production du DRI (Direct Reduction Iron) avec stockage et séquestration de CO<sub>2</sub> (CCS),
- le haut fourneau avec stockage et séquestration de CO<sub>2</sub>,
- cokerie avec CCS,
- Clinker avec CCS,
- certaines installations thermiques et électriques.

Les technologies sont représentées d'une manière agrégée. Elles ne supposent donc pas une représentation séparée de la CCS. Le coût d'investissement de chaque technologie est égal au coût d'investissement de la technologie classique additionné au coût d'investissement pour le CCS (inclus : le captage, le transport et le stockage).

#### **4.4. Approvisionnement en énergie et matières premières : influence sur les choix d'investissement**

Les approvisionnements en énergie et matières premières sont représentés par des technologies d'importations. Ces technologies sont caractérisées par deux paramètres importants : la capacité (et/ou réserve) et le coût d'importation.

Les capacités ou les réserves, expriment les disponibilités des ressources à l'intérieur d'une zone géographique. Le modélisateur pourra ainsi fixer les disponibilités de chaque ressource.

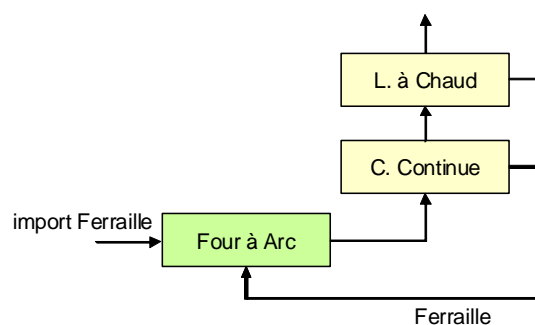
La représentation de l'industrie, indépendamment du reste du système énergétique de référence global<sup>15</sup>, rend l'approvisionnement en ressource moins réaliste, à l'exception de certains cas considérés comme connus. Par exemple, le cas de la disponibilité de la ferraille pour la sidérurgie, la biomasse en France et l'importation de certaines matières premières (exemple : fonte, clinker, pâte à papier...). Il s'agit là d'un travers des modèles d'équilibre partiel qui n'intègrent pas le retour de l'économie dans leurs résultats.

La disponibilité de la ferraille est limitée par la production d'acier. Telle qu'elle a été représentée dans le modèle, celle-ci est égale à la moitié de la production d'acier antérieur de 15 ans en additionnant la quantité de la ferraille récupérée au niveau des procédés de fabrication (coulée continue, laminage à chaud).

---

<sup>15</sup> La modélisation de la demande totale d'énergie peut être appliquée soit à l'ensemble de l'économie, soit au niveau sectoriel, (le résidentiel, le commercial, le transport ou l'industrie), c'est uniquement les industries grosses consommatrices d'énergie qui sont représentées dans le cadre de ce modèle.

$$DispoFr_t = \frac{1}{2} Pr odAc_{t-15} + \delta$$



*DispoFr* : Disponibilité ou réserve de Ferraille,

*Pr odAc<sub>t-15</sub>* : Production d'acier

*δ* : Ferraille récupérée au niveau des procédés (Laminage à chaud, Coulée continue)

Par leur part non négligeable dans la structure des coûts des technologies de production<sup>16</sup>, les coûts d'importation retenus sont exogènes au modèle. Ils représentent les prix de vente des commodités sur le marché Européen voire international. Compte tenu de la diversité géographique, les prix de vente ne sont pas spécifiés par région (à l'exception du prix de l'électricité). A l'inverse, les coûts associés aux infrastructures de transport (gazoducs, bateaux, ...) sur le marché ne sont pas intégrés.

En France, le besoin accru en bois d'industrie, sous l'effet d'un recours plus important aux sources d'énergies renouvelables et une croissance soutenue des secteurs industriels a suscité la nécessité d'estimer les disponibilités en biomasse pour des usages industriels et énergétiques. Dans ce contexte, la DGFAR<sup>17</sup> du ministère de l'agriculture et de la pêche a sollicité le Cemagref<sup>18</sup> pour faire une estimation sur la période 2006-2016. Le rapport stipule que la disponibilité supplémentaire en biomasse est estimée à près de 18 millions de m<sup>3</sup> par an<sup>19</sup>. Sur un volume de 50,4 millions de m<sup>3</sup>, l'industrie consomme 12,4 millions de m<sup>3</sup>.

Code	Description
IMPELC	Electricity Import
IMPGASNAT	Natural Gas Import
IMPFOL	Fuel Oil Import
IMPCOA	Hard Coal Import
IMPBIO	Biomass Import
IMPCOKP	Coke Oil Import
IMPLPG	Liquid Petrol Gas Import
IMPWST	Wastes Import

**Tableau 7 : Technologie d'importation d'énergie**

<sup>16</sup> Leur variation influence largement les critères de choix des nouvelles capacités installées.

<sup>17</sup> Direction Générale de la Forêt et des Affaires Rurales

<sup>18</sup> Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement

<sup>19</sup> Après déduction de la consommation de l'industrie et des ménages

Code	Description
IMPPLP	Pulp Import
IMPCLK	Clinker Import
IMPICM	Cement Import
IMPPIRN	Pig Iron Import
IMPHTH	Heat Import
MINORE	Ore Import
MINSCR	Scrap Iron Import
MINLIM	Lime Stone Import
MINDRI	Direct Reduction Iron Import
MINOXY	Oxygen Import
MINAZT	Azotes Import
MINLMPF	Lump Fines Import
MINDLMT	Dolomites Import
MINPELT	Pellets Import
MINKAO	Kaolin Import
MINGYPS	Gypsum Import
MINNAOH	Sodium Hydroxide Import
MINCHF	Charges & Fibers Import
MINSCLC	Silica Import
MINRCYG	Recycled Glass Import
MINCLY	Clay Import
MINFLR	Filler Import
MINFASH	Fly Ash Import
MINBXT	Bauxite Import
MINLTRT	Slag Import
IMPMPWOO	Wood Import
IMPRCYPPR	Recycled paper Import

**Tableau 8 : Technologies d'importation de matières premières**

Les quantités importées de matières premières sont conditionnées par les besoins directs du procédé. Dans certains cas il est nécessaire de limiter les importations de matières premières intermédiaires pour des questions de réalisme du modèle. En effet, les produits intermédiaires peuvent ne pas contenir la même quantité de CO<sub>2</sub> s'ils sont importés directement ou produits par l'industrie locale. Cette différence peut privilégier les importations dans un scénario avec taxe sur le CO<sub>2</sub> par exemple. Par conséquent, les importations de la pâte à papier, du clinker et de la fonte se voient limitées par les technologies en place qui doivent assurer un minimum de leur production.

Ces limitations d'importations doivent être ajustées avec précision afin de ne pas trop influencer les futurs choix d'investissement dans les nouvelles technologies.

#### **4.5. Les émissions de CO<sub>2</sub> dans l'industrie : une représentation plus fine**

Les estimations des émissions de gaz à effet de serre sont basées sur un cycle d'inventaire d'un an. Cette section décrit les méthodes jugées appropriées pour l'estimation des émissions



de gaz à effet de serre notamment le CO<sub>2</sub><sup>20</sup>. On classe généralement plusieurs méthodes de calcul dépendant de la qualité et du degré de détail accordé à l'estimation.

Dans le modèle TIMES industrie les estimations d'émissions de CO<sub>2</sub> prennent en compte deux cas possibles :

- les estimations de CO<sub>2</sub> relatives aux installations de combustion (chaudières, turbines, cogénération),
- les estimations des émissions de CO<sub>2</sub> associées aux procédés de fabrication.

Dans le premier cas, la méthode choisie est basée sur les combustibles. Les émissions de CO<sub>2</sub> sont estimées à l'aide de l'équation générale suivante :

$$Emi_{CO_2} = ConsoComb \times CoefEmi$$

Cette méthode de calcul exige de bien connaître la quantité et la qualité des divers types de combustibles consommés par les sources de combustion<sup>21</sup> ainsi que l'application des coefficients d'émissions (CE) de CO<sub>2</sub> appropriés. Les émissions globales résultent de l'addition des émissions de chacun des combustibles (sauf pour les biocombustibles par effet photosynthèse).

Les coefficients d'émission de CO<sub>2</sub> applicables aux combustibles dépendent principalement des propriétés du combustible et, à un degré moindre, de la technologie de combustion utilisée. Dans le cadre de la méthode détaillée basée sur les combustibles, l'équation générale suivante peut être utilisée :

$$Emi_{CO_2} = (44/12) \times M_C \times \mu$$

Où :

$M_C$  : Teneur en carbone du combustible

$\mu$  : Fraction du carbone oxydé

Pour l'estimation des émissions de CO<sub>2</sub> des divers procédés industriels la méthode prend en compte les teneurs en carbone des produits en entrée et en sortie utilisés comme matière première. L'équation générale est la suivante :

$$Emi_{CO_2} = CE_P \times Q_P + (M_{CPin} - M_{CPout}) \times 44/12$$

Où:

$CE_P$  : Coefficient d'émission pour l'agent réducteur (tonne de CO<sub>2</sub>/tonne d'agent réducteur);

$Q_P$  : Quantité d'agent réducteur consommée dans le procédé de fabrication

$M_{CPin}$  : Masse de carbone du produit principal à l'entrée du procédé

$M_{CPout}$  : Masse de carbone du produit principal à la sortie du procédé

44/12 : Rapport Stœchiométrique CO<sub>2</sub>/C (masse molaire de CO<sub>2</sub> sur la masse molaire du carbone)

$$CE_P = M_{CP} \times 44/12$$

<sup>20</sup> La construction du modèle accorde la possibilité d'estimer tous les GES émis par une installation ou des parties d'une installation.

<sup>21</sup> La combustion comprend toutes les activités de combustion fixes destinées à produire de l'énergie ou de la chaleur (exemple : production sur place d'électricité, de chaleur et de vapeur).

Exemple pour la sidérurgie**Agglomération**

$$E_{CO2, Sntg} = \left( C_{coke} \times Cc_{Coke} + C_{COG} \times Cc_{COG} + C_{BFG} \times Cc_{BFG} + \left( \sum_i C_{AM_i} \times Cc_{AM_i} \right) - P_{SNTG} \times Cc_{SNTG} \right) \times 44/12, \quad P_{SNTG} = 0 \text{ dans le modèle}$$

**Cokerie**

$$E_{CO2, Cokerie} = \left( C_{coa} \times Cc_{Coa} + C_{BFG} \times Cc_{BFG} + COGF - C_{Coke} \times Cc_{Coke} - C_{COG} \times Cc_{COG} \right) \times 44/12$$

**Haut fourneau**

$$E_{CO2, Fonte} = \left( C_{Coke} \times Cc_{Coke} + C_{ICOA} \times Cc_{ICOA} + C_{COG} \times Cc_{COG} + C_{BFG} \times Cc_{BFG} + BFGF + C_{BOFG} \times Cc_{BOFG} + \left( \sum_i C_{AM_i} \times Cc_{AM_i} \right) - P_{FNT} \times Cc_{FNT} - P_{BFG} \times Cc_{BFG} \right) \times 44/12$$

$Cc_i$ : Masse de carbone du produit $i$ ,	
$C_i$ : Consommation du produit $i$ ,	
$P_i$ : Production du produit $i$ ,	
$COA$ : charbon,	$COGF$ : gaz de cokerie torché,
$COG$ : gaz de cokerie,	$ICOA$ : charbon injecté,
$BFG$ : gaz de haut fourneau,	$BFGF$ : gaz de haut fourneau torché,
$AM$ : autres matériaux (dolomite, chaux...),	$BOFG$ : gaz de convertisseur à oxygène,
$SNTG$ : gaz d'agglomération,	$FNT$ : fonte

Dans le cas des autres gaz à effet de serre (GES), le modèle permet leur estimation car une représentation ouverte a été prévue.

Pour un impact plus adapté aux contraintes environnementales globales, les émissions de CO<sub>2</sub> attribuées à la production d'électricité ont été prises en compte dans le modèle, avec un facteur d'émission spécifique par pays. Ces émissions ne sont pas additionnées dans le calcul des émissions globales de l'industrie, elles ne tiennent compte que de l'effet d'une taxe sur le CO<sub>2</sub>.

#### 4.6. Particularités pour la France : la modélisation des chaudières, une segmentation par type de chaudière

Dans la section 2.1, les questions liées aux chaudières et leur importance dans le bilan énergétique de l'industrie ont été évoquées. Dans ce qui suit, l'accent sera mis sur la manière avec laquelle ces chaudières ont été prises en compte dans le modèle industrie.

Après l'analyse des données du CEREN, notamment pour le parc existant de production de chaleur, plus de 1180 chaudières ont été répertoriées pour l'ensemble des IGCE. Ces chaudières sont classées :

- par type d'énergie et par type de chaudière
- par type d'énergie et par tranche d'âge
- par type d'énergie et par tranche de capacité
- par type d'énergie et par régime de fonctionnement

Les tableaux ci-dessous montrent la segmentation des chaudières<sup>22</sup>.

Type d'énergie						
Houille	Gaz naturel	GPL	FOL	FOD	Electricité	Mixte

**Tableau 9 : Répartition par types d'énergie**

Type d'énergie			
Type de chaudière	Tranche de puissance	Tranche d'âge	Régime de fonctionnement
A tubes d'eau	Moins de 500 kW	Inconnu	3*8 h sans arrêt le week-end
A tubes de fumée	De 500 à 1999 kW	Moins de 5 ans	3*8 h avec arrêt le week-end
De chauffage central	De 2000 à 4999 kW	6 à 10 ans	2*8 h
A vaporisation instantanée	De 5000 à 9999 kW	11 à 15 ans	1*8 h
A thermoplongeurs	De 10000 à 19999 kW	16 à 20 ans	Secours
Electrique à électrodes	De 20000 à 49999 kW	21 à 25 ans	Jours de pointe
De récupération		> à 25 ans	

**Tableau 10 : Répartition des types d'énergie par types de paramètre**

Cette classification est fournie sous forme de projection selon un seul paramètre ce qui ne permet pas de remonter au croisement des paramètres de la segmentation initiale. De ce fait, relier les trois paramètres que sont les tranches d'âge, les capacités installées et les régimes de fonctionnement à une seule chaudière, est une tâche qui s'avère difficile. Néanmoins, deux choix sont possibles :

- une segmentation par type d'énergie,
- une segmentation par type de chaudière et par type d'énergie.

Dans le modèle industrie l'approche de modélisation est une approche par technologie. Donc une segmentation par type de chaudière et par type d'énergie se révèle plus appropriée.

<sup>22</sup> Pour chaque paramètre et pour chaque type d'énergie : le nombre de chaudières, la puissance installée et la consommation d'énergie sont spécifiés.

#### 4.6.1. Durée de vie et disponibilité des chaudières : une segmentation par type de chaudière.

Afin de permettre le croisement de l'ensemble de ces paramètres au type de chaudière, une approche par moyennes pondérées est adaptée. Cette approche consiste, en premier lieu, à agréger les chaudières par type et par énergie. En second lieu à calculer les moyennes pour chaque paramètre et pour chaque type d'énergie. En dernier, à attribuer ces paramètres au type de chaudières agrégées.

$$Moy_{Age} = \frac{\sum n \times Par_{Age}}{\sum n}$$

L'âge moyen de la catégorie d'âge inconnu est égal à la moyenne de toutes les catégories d'âge.

$$Moy_{Disponibilité} = \frac{\sum n \times Par_{Disponibilité}}{\sum n}$$

Dont  $n$  et le nombre de chaudières associées à chaque paramètre.

#### 4.6.2. Pertes de chaufferie et pertes de distribution, un élément à prendre en compte

En plus de la représentation des chaudières, les pertes de chaufferie (pertes associées aux chaudières) et la chaudière de récupération ont été prises en compte. Les pertes de chaufferie sont intégrées directement aux chaudières au prorata de leur capacité installée.

$$ED = CchHR - Pch + EFchR$$

**ED** : Energie disponible à la sortie des chaudières

**CchHR** : production des chaudières hors récupération

**Pch** : pertes de chaufferie

**EFchR** : Energie fournie par les chaudières de récupération.

Les pertes de chaufferie et de distribution représentent 15% de la consommation sous chaudière pour l'ensemble de l'industrie.

Nous venons d'expliquer les spécificités de nos modèles dans la prise en compte détaillée d'aspects fondamentaux des IGCE. En effet, s'agissant d'industrie très lourde, le détail du stock devait être détaillé ainsi que les chaudières qui représentent une part importante des consommations. Un grand nombre de nouvelles technologies a aussi été mis à disposition afin que nos modèles puissent avoir le choix d'évoluer vers un futur moins énergivore ou moins carboné. Voyons maintenant quelques spécificités internes à nos modèles.

## 5. Quelques spécificités dans notre représentation du modèle TIMES industrie

### 5.1. L'industrie valorise ses coproduits

La notion de valorisation des coproduits renvoie à l'utilisation des produits secondaires issus du processus de fabrication, en tant que matière première ou combustibles dans les autres procédés de fabrication.

Dans la valorisation des coproduits de l'industrie, deux cas peuvent surgir : la valorisation des produits intra-secteur et la valorisation des produits inter-secteur. Ces deux cas de figures ont été pris en compte dans la construction du modèle industrie et les deux sections ci-dessous les mettent en évidence.

#### 5.1.1. La valorisation interne des coproduits : comment assurer la consistance de TIMES

Dans la représentation du modèle TIMES industrie, les retours de produits dans les procédés de fabrication peuvent poser certains problèmes.

Tels qu'ils sont décrits dans la Figure 29, les gaz sidérurgiques (gaz de cokerie (COG), gaz de haut fourneau (BFG) et le gaz de convertisseur à oxygène (BOFG)) sont consommés à la fois à l'intérieur du procédé de fabrication et en même temps dans les autres procédés de fabrication (exemple : le COG est consommé au niveau de la cokerie et au niveau du haut fourneau).

Pour l'industrie du papier (

Figure 30), la liqueur noire et les déchets du bois issus des procédés de fabrication sont consommés sous chaudière pour les besoins en énergie des procédés.

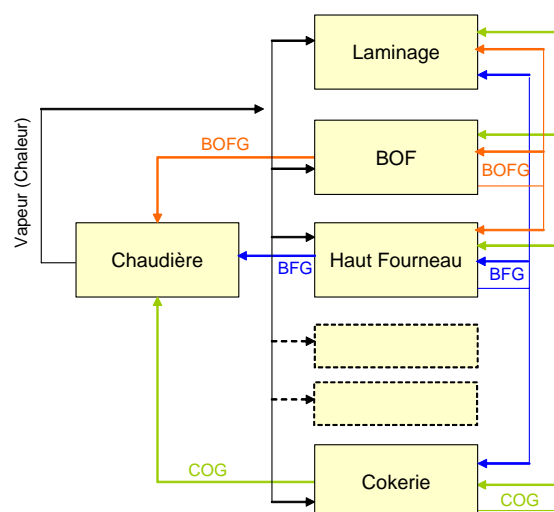
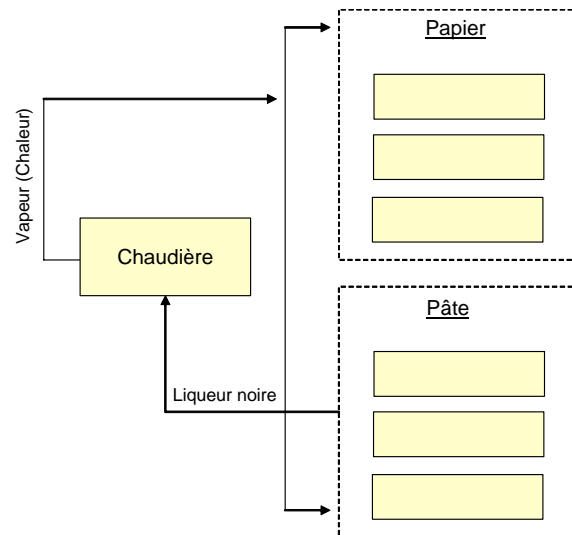


Figure 29: La valorisation des produits dans l'industrie de la sidérurgie



**Figure 30 : La valorisation des produits dans l'industrie du papier**

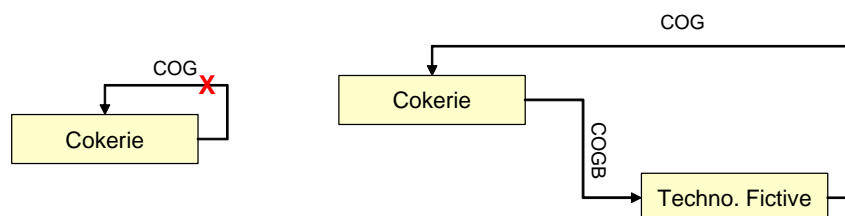
De ce fait et spécifiquement à ces deux industries (papier et sidérurgie), la valorisation des produits présente deux cas de figure :

1. la valorisation des produits entre les procédés de fabrications,
2. la valorisation des produits dans le procédé lui-même.

Le premier cas ne pose pas de problème dans la représentation du modèle TIMES : cette caractéristique est prise en compte dans les fonctionnalités du modèle. En spécifiant le produit principal et les produits secondaires à la sortie du procédé, les produits secondaires sont repris automatiquement par les autres procédés de fabrication s'ils sont spécifiés comme entrées par les dits procédés.

Le second cas est très particulier car il pose certains problèmes de consistance du modèle TIMES. En effet, dans TIMES à l'exception du procédé de stockage, les procédés de production ne peuvent admettre des entrées identiques aux sorties. Pour contourner ce problème nous proposons deux solutions :

**La construction d'une technologie fictive<sup>23</sup>** : Elle permet de construire une étape intermédiaire pour contourner le problème. Il s'agit de spécifier en premier lieu une nomenclature différente entre le produit en entrée et le produit en sortie. En deuxième lieu reprendre la nomenclature initiale au produit (Figure 31).



**Figure 31 : schéma descriptif de la construction d'une technologie fictive**

<sup>23</sup> Cette même présentation a été accordée à la chaleur issue des chaudières et consommée par des cogénérations pour la production d'électricité et de chaleur. En réalité, la chaleur issue des chaudières est dite haute pression et celle des cogénérations basse pression, mais comme les deux types de chaleurs ne sont pas distingués au niveau du procédé elles sont considérées de même type.

**Soustraire la consommation spécifique consommée du total produit :** dans cette représentation il suffit de diminuer la part ramenée à l'unité du produit consommé de la part produite. Donc la part à la sortie du procédé ( $Part_{Out}$ ) est égale à la part produite réellement ( $Part_{Prod}$ ) moins la part consommée ( $Part_{Conso}$ )

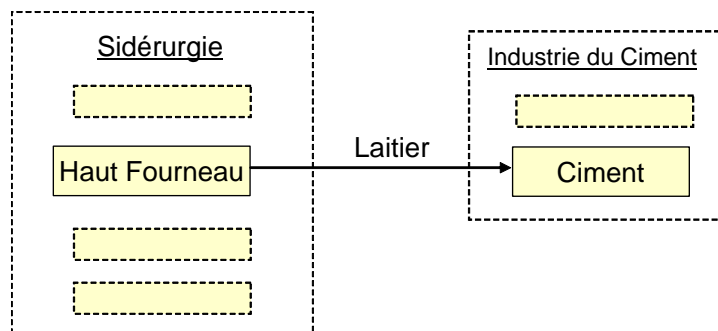
$$Part_{Out} = Part_{Prod} - Part_{Conso}$$

Les deux méthodes présentent des avantages, la soustraction de consommation spécifique et rapide et n'alourdit pas le système d'équations. En revanche, le taux d'utilisation interne reste fixé. Si l'on veut le modifier il faut recompiler le modèle, ce qui alourdit grandement son utilisation. Pour ce qui est de la méthode des technologies fictives, elle permet plus de souplesse dans le fonctionnement du modèle, en revanche elle augmente le nombre de variables du système.

Cependant, nos modèles ne demandant pas un temps de calcul considérable, nous avons préféré les technologies fictives pour plus de souplesse.

### 5.1.2. La valorisation inter-sectoriel dans le modèle industrie

La valorisation des produits ne se limite pas à la seule dimension intra sectoriel. En effet, certains produits issus d'un secteur peuvent être utilisés comme matière première par un autre secteur. Par exemple, l'utilisation du laitier de haut fourneau comme additif au clinker pour la production du ciment ou la chaux brûlée pour la production d'acier.



**Figure 32 : Consommation du laitier issu de la sidérurgie pour la fabrication du ciment**

Néanmoins, certains problèmes peuvent être rencontrés lors de la représentation des échanges de produits inter-sectoriels dans le modèle. La consommation de chaux issue directement du procédé de fabrication pour la fabrication d'acier pourra altérer les prévisions de consommations énergétiques de l'industrie de la chaux. En effet, en plus de la production fixée par le scénario de demande finale, le procédé de fabrication de chaux doit satisfaire en outre la demande du secteur de la sidérurgie. Par conséquent, la production totale sera supérieure à la demande considérée et les consommations énergétiques seront nettement surestimées. Pour remédier à ce problème, la chaux nécessaire aux procédés de fabrication d'acier est fournie par une technologie d'importation fictive (Figure 33).

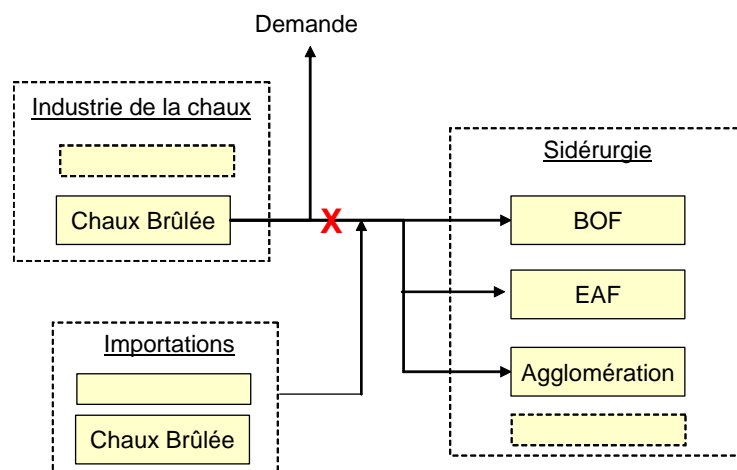


Figure 33 : Exemple pratique sur la valorisation des produits

## 6. Conclusion

Nous venons de voir deux cas demandant une attention particulière afin d'obtenir une représentation la plus juste possible et permettant d'éviter certains biais de modélisations.

Ce chapitre nous a permis de montrer notre démarche dans l'établissement de nos modèles de l'industrie IGCE. Nous avons motivé notre approche et nos choix de modélisation. Ensuite nous avons exposé les difficultés inhérentes à ce secteur et montré la démarche qui nous a permis de les contourner. Finalement, nous avons construit une démarche permettant de modéliser le secteur Européen des IGCE à partir d'un modèle plus détaillé pour la France. Nous avons mis en annexe le détail du modèle pour certains secteurs afin de mieux appréhender la méthodologie retenue ainsi que l'ampleur de la tâche.

Nos modèles ayant été établis, nous passons maintenant aux résultats obtenus. Ces résultats nous permettent de mesurer de la pertinence de notre modélisation.



## 7. Bibliographie

### [Barker, 2007]

Barker T., Ekins P., Foxon T., Macroeconomic effects of efficiency policies for energy-intensive industries: The case of the UK Climate Change Agreements, 2000–2010, Energy Economics, 2007.

### [Bertoldi, 2000]

Bertoldi P., the use of Long term Agreements to Improve Energy Efficiency in the Industrial sector: Overview of the European Experiences and Proposal for a Common Framework, European Commission, 2000.

### [Coito, 2005]

Coito F., and al., Case Study of the California Cement Industry, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.

### [De Miglio, 2006]

De Miglio R., Gargiulo M., Lavagno E., Integration of comprehensive analysis with sub-system and component modelling tools for local energy planning. Politecnico di Torino – Energy Department, Torino, ITALY, 2006.

### [EIA, 2004]

EIA, Model Documentation Report: Industrial Sector Demand Module of the National Energy Modeling System, Office of Integrated Analysis and Forecasting, Energy Information Administration, 2004

### [Gielen, 2006]

Gielen D., Tam C., Energy use, technologies and CO<sub>2</sub> emissions in the pulp and paper industry. Paper prepared for the workshop “Energy efficient technologies and CO<sub>2</sub> reduction potentials in the pulp and paper industry”. IEA, 2006.

### [Gielen, 2007]

Gielen D., Taylor M., Modelling industrial energy use: The IEAs Energy Technology Perspectives, Energy economics, 2007.

### [Groenenberga, 2004]

Groenenberga H., Blok K., van der Sluijs J., Projection of energy-intensive material production for bottom-up scenario building, Ecological Economics, 2004

### [Ji Raina, 2002]

Ji Raina S., Energy Efficiency Improvement in Indian Cement Industry, IIPEC Programme, 2002.

**[Khurana, 2001]** Khurana S. et al., Energy balance and cogeneration for a cement plant, Applied Thermal Engineering, 2001.

**[Lecarpentier, 2003]**

Lecarpentier J., Kassabji F., Evolution of the Energy demande in the Cement Industry of tomorrow, Europäisches Institut für Energieforschung, Electricité de France / Universität Karlsruhe (TH) EWIV, 2003.

**[M. Rue, 2006]**

M. Rue D., et al, Industrial Glass Bandwidth Analysis, Gas Technology Institute, Energy Utilization Center, 2006.

**[Martin, 1999]**

Martin N., et al., Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions Reduction Opportunities in the U.S. Cement Industry, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.

**[Martin, 2000]**

Martin N., et al, Emerging Energy Efficient Industrial Technologies, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.

**[Neelisa, 2007]**

Neelisa M., et al., Boonekampb Energy efficiency developments in the Dutch energy-intensive manufacturing industry, 1980–2003, Energy Policy, 2007.

**[OECD, 2001]**

OECD, An Initial View on methodologies for Emission Baselines: Iron and Steel Case Study, Organisation for Economic Co-operation and Development and International Energy Agency, 2001

**[Price, 2006]**

Price L., Prospects for Efficiency Improvements in China's Cement Sector, personal presentation at Cement Energy Efficiency Workshop Organised by IEA in cooperation with WBCSD, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2006.

**[Ross, 2004]**

Ross P., et al., Glass Melting Technology: A Technical and Economic Assessment, Glass Industry Consulting International, 2004.

**[Ruth, 2000]**

Ruth M., et al., Evaluating Clean Development Mechanism Projects in the Cement Industry Using a Process-Step Benchmarking Approach, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.

**[Rutha, 2003]**

Rutha M., Davidsdottir B., Amatoc A., Climate change policies and capital vintage effects: the cases of US pulp and paper, iron and steel, and ethylene, Environmental Management, 2003

**[Utlu, 2006]**

Utlu Z., et al., Energy and exergy analyses of a raw mill in a cement production, Applied Thermal Engineering, 2006.

**[Wang, 2008]**

Wang J., et al., Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry, Applied Energy, 2008

**[Worrell, 2004]**

Worrell E., Galitsky C., Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers, Environmental Energy Technologies Division, Sponsored by the U.S. Environmental Protection Agency, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.

**[Worrell, 2007]**

Worrell E., et al., Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Glass Industry An Energy Star Guide for Energy and Plant Managers, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007.

**[Worrell, 2007]**

Worrell E., et al., World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007.

---

## **CHAPITRE IV**

### ***HYPOTHESES ET ANALYSE DES RESULTATS***

---

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>137</b>
<b>2. CALIBRAGE ET VALIDATION DU MODELE.....</b>	<b>137</b>
2.1. CALIBRAGE DU MODELE POUR L'ANNEE DE REFERENCE .....	138
2.1.1. <i>Les consommations énergétiques</i> .....	138
2.1.2. <i>Les émissions de CO<sub>2</sub></i> .....	139
2.2. VALIDATION DU MODELE PAR D'AUTRES SOURCES DE DONNEES .....	140
<b>3. LA DEMARCHE PROSPECTIVE .....</b>	<b>141</b>
<b>4. LES HYPOTHESES COMMUNES AUX SCENARIOS D'ANALYSE.....</b>	<b>142</b>
4.1. CONSTRUCTION DES PROJECTIONS DE LA DEMANDE INDUSTRIELLE.....	142
4.1.1. <i>Cas de l'Europe</i> .....	142
4.1.2. <i>Cas de la France</i> .....	144
4.2. LE PRIX DES MATIERES PREMIERES .....	146
4.3. LE TAUX D'ACTUALISATION.....	147
4.4. HYPOTHESES D'ORDRE GENERAL .....	148
<b>5. SCENARIOS DE PRIX DES ENERGIES : HYPOTHESES RETENUES.....</b>	<b>152</b>
<b>6. DESCRIPTION DES SCENARIOS POUR L'ANALYSE.....</b>	<b>153</b>
6.1. LE SCENARIO TENDANCIEL (SCTEND).....	153
6.2. LE SCENARIO ENVIRONNEMENTAL POST KYOTO (SCATAX) .....	154
6.3. LE SCENARIO FACTEUR 4 (SCBND, SCBNDDT).....	155
<b>7. PRINCIPAUX RESULTATS D'ENSEMBLE .....</b>	<b>157</b>
7.1. SCENARIO AVEC TAXE CARBONE (SCATAX) : DES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES ORIENTEES VERS LE GAZ NATUREL .....	158
7.1.1. <i>Profil d'évolution des consommations énergétiques</i> .....	158
7.1.2. <i>La structure des consommations énergétiques des IGCE est tirée globalement par la sidérurgie</i> .....	159
7.1.3. <i>Les IGCE ont réalisé des efforts d'économie d'énergie</i> .....	160
7.1.4. <i>Coût marginal des nouvelles technologies un élément déterminant pour l'aide à la décision</i> .....	163
7.1.5. <i>La croissance de la demande finale reflète les volumes des consommations énergétiques</i> .....	167
7.1.6. <i>Effet de variation de la taxe de CO<sub>2</sub> sur les consommations énergétiques des IGCE</i> .....	168
7.1.7. <i>Emissions de CO<sub>2</sub> des IGCE scenario avec taxe (SCATax)</i> .....	169
7.2. SCENARIO FACTEUR 4 (SCBNDDT) : ENTRE ELECTRICITE ET STOCKAGE DE CO <sub>2</sub> .....	170
7.2.1. <i>Profil d'évolution des consommations énergétiques</i> .....	170
7.2.2. <i>Les chemins technologiques pour la réalisation du facteur 4</i> .....	171
7.2.3. <i>La réalisation du facteur 4 sans la séquestration et le stockage de CO<sub>2</sub></i> .....	172
7.2.4. <i>Emissions de CO<sub>2</sub> des IGCE</i> .....	175
7.3. LE COUT DE LA CONTRAINTE ENVIRONNEMENTALE EST DIFFERENCIE PAR PAYS EN EUROPE .....	177
7.4. TAUX D'ACTUALISATION DU CAPITAL UNE MOYENNE PONDEREE DES RETOURS SUR INVESTISSEMENT .....	178
<b>8. CONCLUSION.....</b>	<b>179</b>
<b>9. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>180</b>

### ➤ LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : prix de matière premières (€ <sub>2000</sub> /t).....	147
Tableau 2 : Les facteurs d'émissions de CO <sub>2</sub> des combustibles (valeur par défaut) .....	149
Tableau 3 : Les facteurs d'émissions de CO <sub>2</sub> pour les autres matériaux (valeur par défaut). .....	150
Tableau 4 : Contenu de CO <sub>2</sub> du kWh électrique par pays.....	150
Tableau 5 : Les hypothèses exogènes des scénarii de prix de POLES .....	152

### ➤ LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Calibrage des consommations énergétiques du modèle (TWh) .....	138
Figure 2 : Schéma explicatif du calibrage .....	139
Figure 3 : Calibrage du modèle émissions de CO <sub>2</sub> en (Mt) .....	140
Figure 4 : Validation des consommations énergétiques du modèle (TWh) .....	141
Figure 5 : Schéma descriptif des scénarios de référence.....	142
Figure 6 : Scénario de croissance de la demande des IGCE pour la Belgique et l'Allemagne .....	143
Figure 7 : Scénario de croissance de la demande pour les IGCE en France .....	146
Figure 8 : Indice de prix des importations de matières premières pour l'industrie.....	147
Figure 9 : Scénario de prix des énergies scénario tendanciel pour la France et le reste de L'Europe (€ <sub>2000</sub> /MWh) .....	154
Figure 10 : Taxe sur le CO <sub>2</sub> appliquée aux secteurs industriels (€/t) .....	155
Figure 11 : Scénario de prix des énergies pour la France et le reste des pays européens scénario avec une taxe sur le CO <sub>2</sub> (€ <sub>2000</sub> /MWh).....	155
Figure 12 : Scénario facteur 4 national pour l'industrie (plafond sur les émissions de CO <sub>2</sub> ) pour l'ensemble de l'industrie (MtCO <sub>2</sub> ).....	156
Figure 13 : Scénario de prix des énergies pour la France et le reste des pays européens scénario facteur 4 (€ <sub>2000</sub> /MWh) .....	157
Figure 14 : Consommation énergétique des IGCE (TWh), scénario tendanciel et avec taxe .....	158
Figure 15 : Répartition des consommations énergétiques des IGCE en 2050, scénario tendanciel et scénario avec taxe .....	159
Figure 16 : le poids de la sidérurgie dans les consommations énergétique des IGCE .....	159
Figure 17 : Structure technologique de l'industrie sidérurgique (Mt) dans le cas d'une taxe sur le CO <sub>2</sub> .....	160
Figure 18 : Effort d'économie d'énergie (toutes énergie confondues) réalisé par les IGCE (TWh) scénario avec taxe.....	161
Figure 19 : Les économies d'énergie réalisées dans la sidérurgie .....	161
Figure 20 : Coût marginal de production industriel scénario avec taxe .....	162
Figure 21 : Efforts d'économie d'énergie de l'industrie du papier .....	162
Figure 22 : Efforts d'économie d'énergie de l'industrie du verre.....	163
Figure 23 : Efforts d'économie d'énergie de l'industrie du ciment .....	163
Figure 24 : Consommation unitaire moyenne des combustibles par technologie kWh/t.....	165
Figure 25 : Consommation unitaire moyenne d'électricité par technologie kWh/t .....	165
Figure 26 : Coûts marginaux des technologies de la sidérurgie.....	166
Figure 27 : Effet de la variation de la taxe sur les coûts marginaux de production .....	167
Figure 28 : Sensibilité des consommations énergétiques à la variation de la demande.....	168
Figure 29 : Effet de variation de la taxe CO <sub>2</sub> sur les consommations énergétiques (TWh)... ..	168
Figure 30 : Effort de réduction des émissions de CO <sub>2</sub> .....	169

Figure 31 : Effet de la variation de la taxe CO <sub>2</sub> sur les émissions globales .....	169
Figure 32 : Consommations énergétiques des IGCE scénario tendanciel et scénario facteur 4 .....	170
Figure 33 : Répartition des consommations énergétiques des IGCE en 2050, scénario tendanciel et scénario facteur 4 .....	170
Figure 34 : Effort d'économie d'énergie (toutes énergies confondues) réalisé par les IGCE (TWh) scénario facteur 4.....	171
Figure 35 : Structure technologique des IGCE permettant le facteur 4 .....	172
Figure 36 : Profil de production et consommations énergétiques industrie du ciment scénario facteur 4 sans CCS .....	173
Figure 37 : Profil de production du verre scénario facteur 4 sans CCS .....	173
Figure 38 : Profil de production et consommations énergétiques industrie du verre scénario facteur 4 sans CCS .....	174
Figure 39 : Coût marginal de production dans l'industrie du verre, scénario facteur 4 sectoriel (SCBND).....	174
Figure 40 : Emissions et coût marginal d'abattement de CO <sub>2</sub> des IGCE, cas d'un facteur 4 .....	175
Figure 41 : Structure sectorielle des émissions de CO <sub>2</sub> par effet d'un facteur 4 global ou sectoriel .....	175
Figure 42 : Coût marginal d'abattement de la tonne de CO <sub>2</sub> .....	176
Figure 43 : Profil de production et émissions de CO <sub>2</sub> de l'industrie du papier (Mt) .....	177
Figure 44 : Les technologies de production de chaleur dans l'industrie papetière (TWh) ....	177
Figure 45 : Le coût de la contrainte environnementale par pays en Europe .....	178
Figure 46 : Structure technologique de l'industrie à un taux d'actualisation à 10% .....	178
Figure 47 : Les émissions de CO <sub>2</sub> avec la variation du taux d'actualisation .....	179

## 1. Introduction

Après avoir établi précédemment nos modèles d'IGCE, ce dernier chapitre a pour objectif de les valider par l'élaboration et l'analyse des résultats issus de trois scénarios énergétiques appliqués à la France et à l'UE sur l'ensemble de l'horizon de temps considéré.

Comme pour toute étude prospective, nos simulations font appel à des scénarii exogènes. Plus spécifiquement l'évolution de la demande finale (représentée par l'évolution des productions des produits industriels dans notre cas : acier, papier, verre plat ...), des prix des matières premières et des énergies, des politiques environnementales ainsi que les disponibilités de futures technologies.

Nous allons décrire dans ce qui suit nos différentes entrées du modèle pour la France et le reste des pays membres de l'Union Européenne (UE).

Les résultats exposés dans le cadre de ce document ne représentent pas l'ensemble des résultats du modèle. Ils sont orientés de manière à prendre en compte les particularités de chaque secteur industriel par leurs réactions aux scénarii étudiés. Les résultats sont décrits explicitement pour la France et pour quatre secteurs industriels (sidérurgie, papier, ciment et verre) avec une approche comparative par rapport aux six pays européens suivants : l'Allemagne, le Royaume-Uni, la Belgique, l'Espagne, l'Italie et la Pologne. Pour le reste des pays européens et les autres secteurs, l'exploitation des résultats a été mise à la disposition d'EDF.

Le Choix des quatre secteurs industriels est motivé par le comportement différent de chaque secteur aux contraintes environnementales et aux contraintes de prix des énergies. Cette variabilité entre les secteurs sera exposée au fur et à mesure de l'analyse des résultats.

L'étude est répartie en deux grandes parties :

- L'établissement des scénarios de référence
- L'analyse des résultats

Avant d'exposer les hypothèses retenues et les résultats du modèle, nous allons d'abord nous assurer de la consistance et la cohérence du modèle aux données de l'année en cours. A cet effet, nous allons consacrer une partie importante au calibrage et à la validation du modèle.

## 2. Calibrage et validation du modèle

Avant de solliciter notre modèle, il faut d'abord s'assurer de la consistance des données représentant notre système à l'année de base. Il faut être sûr que le modèle représente bien l'état des IGCE au début de l'horizon de travail que nous nous sommes fixé. Ensuite nous pourrions obtenir le coût global actualisé minimal selon les scénarii d'étude et analyser les chemins technologiques proposés par le modèle.



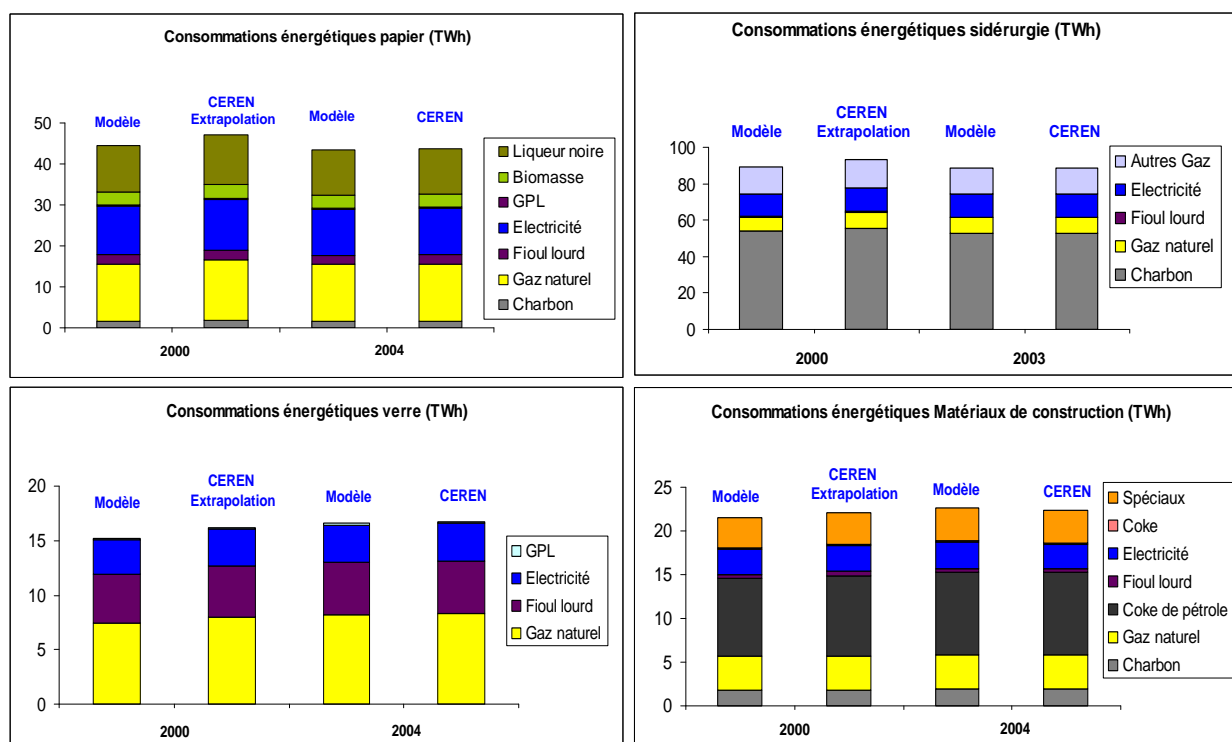
## 2.1. Calibrage du modèle pour l'année de référence

### 2.1.1. Les consommations énergétiques

Les données nécessaires, permettant d'atteindre le niveau de détail souhaité pour la construction du modèle pour les IGCE, sont disponibles sur des années différentes selon les secteurs (par exemple, les données détaillées de l'industrie du papier sont disponibles en 2001, celles de la sidérurgie en 2003, celles de l'industrie du verre et des matériaux de construction en 2004). Cet aspect variable de la disponibilité des données est dû aux rapports d'enquêtes du CEREN établis tous les 3 ans pour chaque secteur. Par conséquent, cela pose problème quant à la représentation d'une unique année de référence. Afin d'y parvenir, une réflexion particulière a été menée sur le calibrage et la définition de cette année de référence unique.

Le calibrage du modèle est assuré, pour chaque secteur, à l'année de disponibilité des données en fixant les consommations spécifiques d'énergie pour les procédés et l'activité des installations thermique.

En plus du calibrage du modèle, on conforte la bonne représentation de l'année de référence par la comparaison des données calculées par le modèle avec les données des sources extrapolées (Figure 1). La méthode de calcul est décrite ci-dessous.

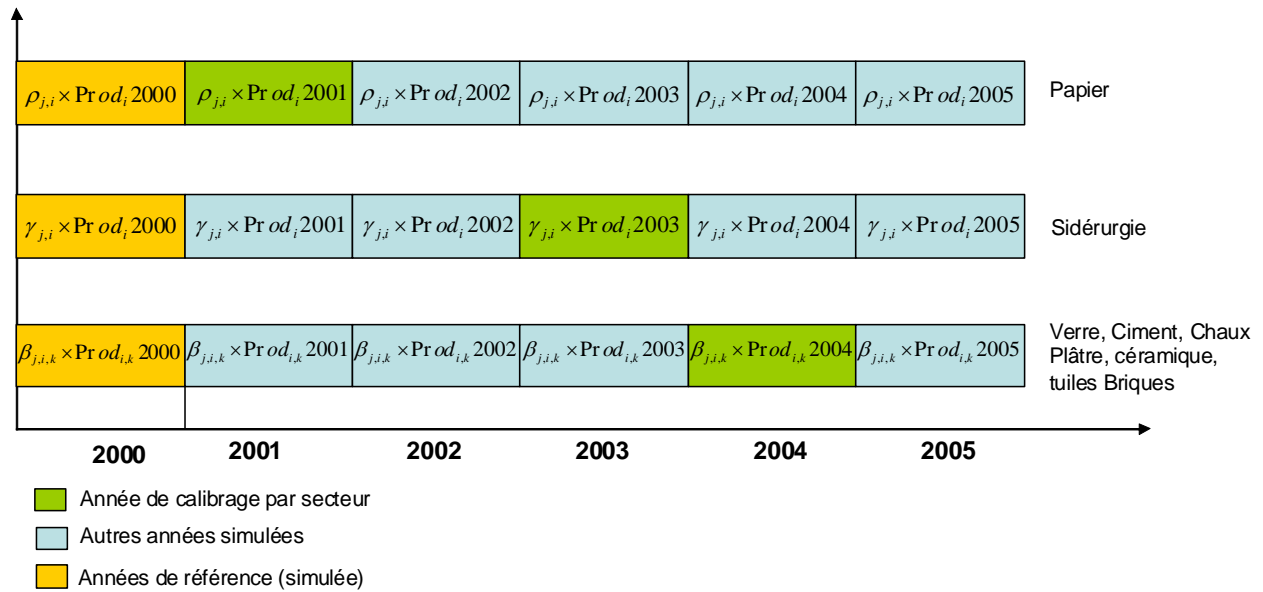


**Figure 1 : Calibrage des consommations énergétiques du modèle (TWh)**

Avant d'expliquer la méthode, il faut retenir que cette hétérogénéité des données concerne uniquement la France. Les données des autres pays européens sont toutes disponibles à l'année 2000.

L'ajustement des données du modèle se base sur un principe simple. Considérons que la consommation spécifique d'énergie calculée à l'année de calibrage est constante et nous l'appliquons à la production de l'année simulée. Nous pouvons ainsi ramener les données disponibles à l'année que nous prenons comme référence en l'occurrence l'année 2000.

Cette hypothèse est justifiée dans le domaine des IGCE car ces industries sont assez inertes dans un intervalle de temps aussi court (si on considère qu'aucun investissement lourd n'a été effectué pendant cette période). Par conséquent les consommations spécifiques ne peuvent évoluer de façon considérable.



**Figure 2 : Schéma explicatif du calibrage**

$$\rho_{j,i} = \frac{\text{Conso}_{j,i} 2001}{\text{Pr } od_i 2001}, \gamma_{j,i} = \frac{\text{Conso}_{j,i} 2003}{\text{Pr } od_i 2003}, \beta_{j,i,k} = \frac{\text{Conso}_{j,i,k} 2004}{\text{Pr } od_{i,k} 2004},$$

$j = \text{Energie}, i = \text{Produit}, k = \text{Secteur}$

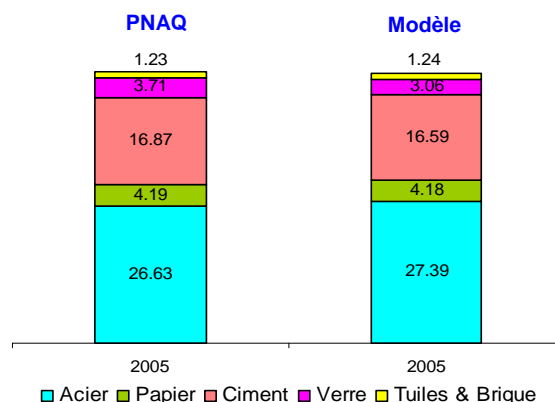
### 2.1.2. Les émissions de CO<sub>2</sub>

Les émissions de CO<sub>2</sub> n'ont subi aucun calibrage, elles représentent les résultats des facteurs d'émissions standards représentés aussi finement que possible dans le cas de l'industrie.

Le graphe ci-dessous montre que les données relatives aux émissions de CO<sub>2</sub> issues du modèle s'accordent correctement avec les données publiées par le CITL dans le cadre du plan français d'allocation de quotas de CO<sub>2</sub> (PNAQ)<sup>1</sup>. Certains écarts peuvent être remarqués notamment dans le cas de l'industrie des autres matériaux de construction et de la sidérurgie (exemple : les émissions de CO<sub>2</sub> pour le secteur du verre en France pour l'année 2005 sont de 3,71 Mt selon le PNAQ<sup>2</sup>, ce niveau d'émissions est supérieur aux émissions issues du modèle pour la même année 2005 soit 3,06 Mt. Pour la sidérurgie 27,39 dans le PNAQ contre 26,63 MtCO<sub>2</sub>).

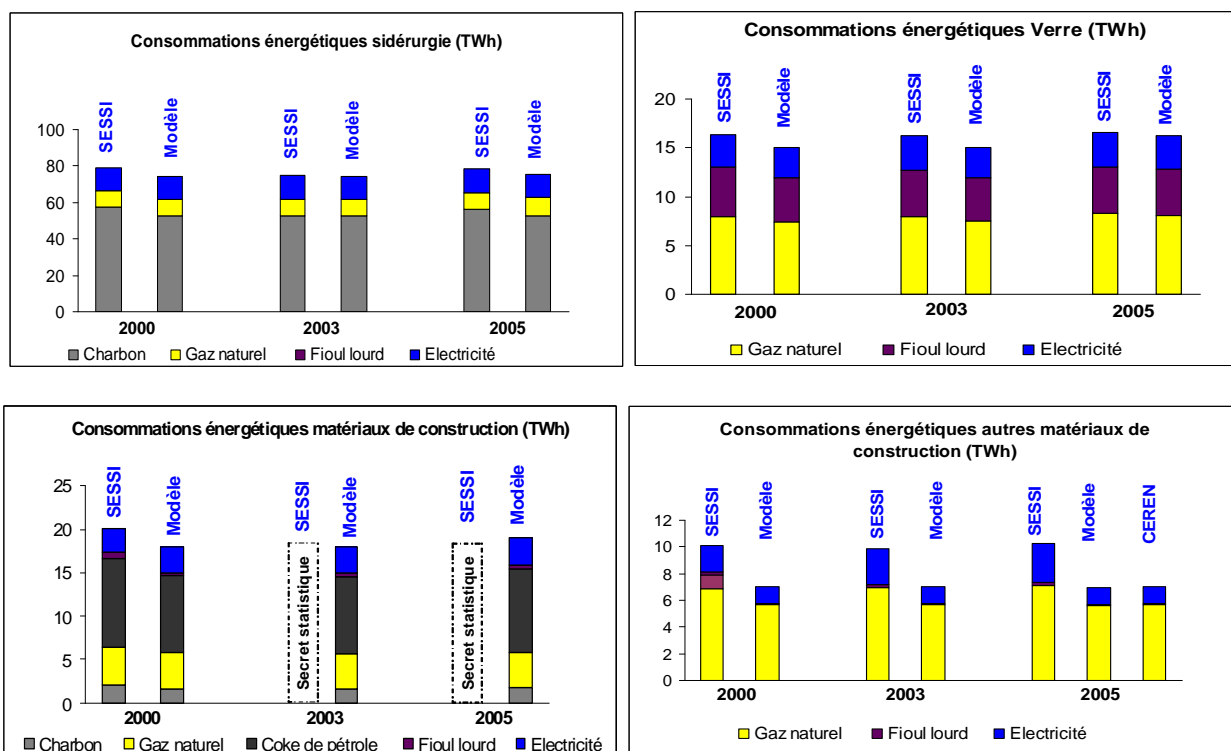
<sup>1</sup> Cette similitude d'émissions permet une cohérence dans le cas de l'application de scénario Facteur 4.

<sup>2</sup> Plan national d'allocation des quotas de gaz à effet de serre.

Figure 3 : Calibrage du modèle émissions de CO<sub>2</sub> en (Mt)

## 2.2. Validation du modèle par d'autres sources de données

A l'année de base les consommations énergétiques sont calibrées avec les données du CEREN tel que spécifié ci-dessus. En outre, comparer les consommations énergétiques en sortie du modèle sur quelques années (les premières années) avec une autre source de référence permet d'estimer plus finement la fiabilité du modèle. Les données en sortie du modèle sont comparées sur les 5 premières années<sup>3</sup> avec les données du SESSI. Les graphes ci-dessous montrent bien la validation du modèle. Les résultats s'accordent correctement à l'exception des matériaux de construction, cette différence peut s'expliquer par l'effet périmètre (car les données du SESSI ne s'accordent pas exactement avec les données CEREN sur lesquelles le modèle est calibré) (Voir figures ci-dessous).



<sup>3</sup> 2005 étant la dernière année récente des données de production historiques.

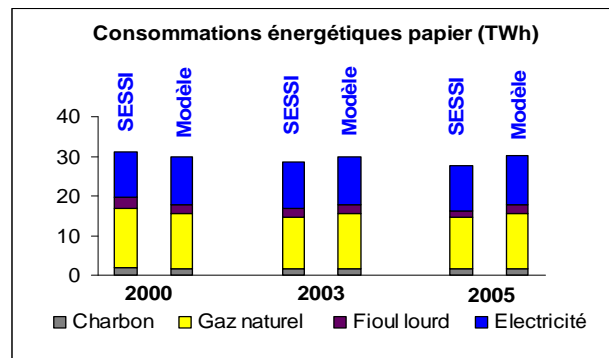


Figure 4 : Validation des consommations énergétiques du modèle (TWh)

### 3. La démarche prospective

Cette étude prospective inclut trois variables exogènes essentielles pour déterminer l'évolution des consommations énergétique de l'industrie :

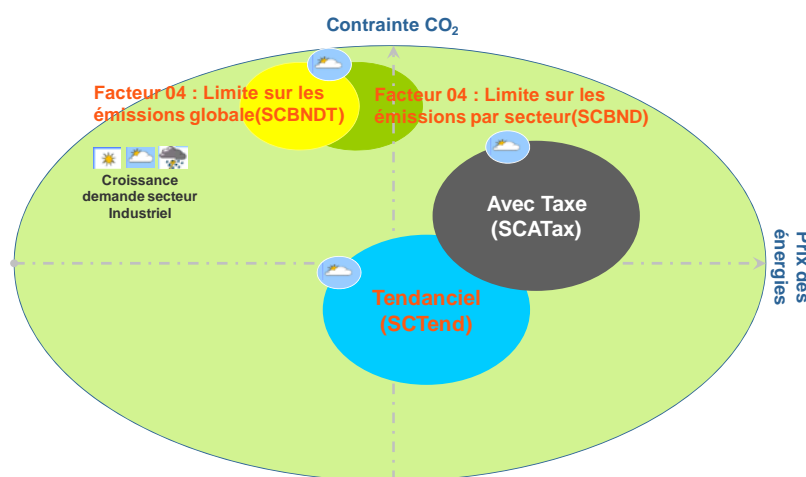
- la croissance de la demande,
- le prix des énergies et matières premières,
- la contrainte environnementale (ne concerne que les émissions de CO<sub>2</sub>).

Basés sur ces variables, trois scénarii distincts pour estimer la réaction de l'industrie à chacune de ces différentes sollicitations ont été élaborés.

Ces scénarii sont définis de la manière suivante :

- Un **scénario tendanciel (SCTend)**, dans lequel aucune contrainte environnementale n'est appliquée.
- Un **scénario avec taxe (SCATax)**, caractérisé par l'application d'une taxe sur les émissions de CO<sub>2</sub> de 50€/t.
- Un **scénario facteur 4**, spécifié par une contrainte physique (plafond) sur les émissions de CO<sub>2</sub>, à l'image des engagements de la commission européenne sur la réduction des émissions de GHG de 20% à l'horizon 2020, et 25% en 2050. Cette contrainte est appliquée de deux manières, une contrainte globale (nationale industrie) sur le secteur industriel dans son ensemble (**SCBNDT**) et une contrainte appropriée à chaque secteur industriel (**SCBND**) basée sur les systèmes nationaux de quotas d'émissions dit de PNAQ I.

Ces scénarii seront détaillés dans les sections qui suivent.



**Figure 5 : Schéma descriptif des scénarios de référence**

Ces scénarii ont été établis dans le but de solliciter nos modèles afin de montrer la pertinence de la modélisation et plus particulièrement le choix du niveau de désagrégation.

Il est bien évident que les choix effectués ne sauraient être aussi développés et pertinents que ceux qui peuvent être établis dans le cadre d'études dédiées à l'analyse des résultats d'un exercice de prospective devant répondre à une question particulière posée. Néanmoins ils permettent d'obtenir un jeu de résultats exploitables dans la limite de la validation des hypothèses retenues pour l'établissement de ces trois scénarii.

Il est illusoire de penser pouvoir mener de front l'établissement de tels modèles et une étude détaillée de scénarii permettant d'aboutir à une analyse fine des résultats obtenus. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes concentrés sur l'établissement des modèles et leur validation à partir de scénarii construits sur les résultats d'autres exercices de modélisations sans justifier pleinement des choix effectués et de leur pertinence. Nous invitons le lecteur à se référer à la bibliographie afin de trouver toutes les hypothèses sous jacentes à ces choix.

## **4. Les hypothèses communes aux scénarios d'analyse**

### **4.1. Construction des projections de la demande industrielle**

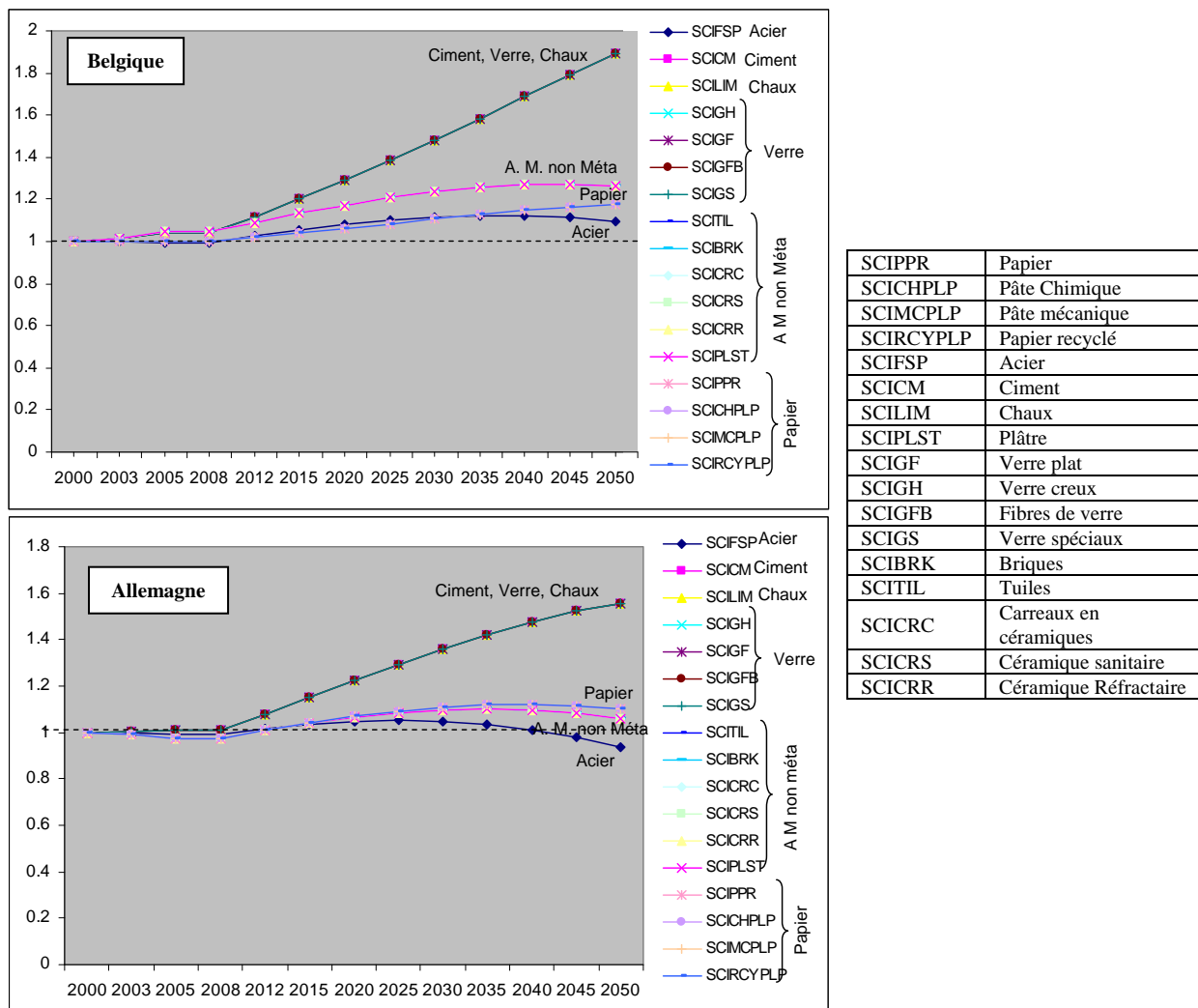
Dans le cas de secteurs industriels, nous utiliserons de façon indifférenciée comme entrée exogène au modèle, la demande ou la production. En effet, s'agissant d'IGCE, toute la production est entièrement répartie dans tous les secteurs de la demande. Ce sont donc les évolutions de production qui feront office d'évolutions de la demande.

#### **4.1.1. Cas de l'Europe**

Les projections de la demande Globale des IGCE sont établies à partir des projections issues du modèle GEM-E3<sup>4</sup>. Ci-dessous (Figure 6) sont exposés deux exemples de projection de la

<sup>4</sup> Le modèle GEM-E3 (General Equilibrium Model for Energy-Economy-Environment interactions) suit la méthodologie des

demande des IGCE en Belgique et en Allemagne. Nous présentons en ordonnée le facteur multiplicatif (1.2 représente 20% de surplus).



**Figure 6 : Scénario de croissance de la demande des IGCE pour la Belgique et l'Allemagne**

Bien que les projections de la demande industrielle ne soient pas strictement comparables entre elles, les projections de la pâte à papier mécanique, chimique et recyclée sont assimilées à celle du papier. Les projections pour les briques, la céramique, les tuiles et le plâtre sont assimilées à celle des autres minéraux non métalliques (A. M. non Méta). Toute projection est soumise, de part sa construction à des révisions ultérieures.

### ➤ Les hypothèses centrales utilisées dans le modèle GEM-E3

Les hypothèses économiques centrales ont été établies à partir de l'étude de publications faisant référence dans le domaine [Van Regemorter, 2006 ; Cosmi, 2008].

Pour les entrées exogènes du modèle GEM-E3 telles que les prix des énergies et la croissance démographique le modèle compte sur des projections européennes.

Les prix internationaux de l'énergie sont ceux utilisés dans PRIMES<sup>5</sup> pour les projections de la DGTREN<sup>6</sup>. Après la forte hausse en 2005, les prix du pétrole reviennent à des prix plus raisonnables avant d'augmenter graduellement après 2010. Le prix du gaz indexé au prix du pétrole, évolue en parallèle. Après 2030, l'évolution des prix a été prolongée tendanciellement et non évaluée.

La population européenne est projetée de manière à être plutôt stable, elle croît légèrement jusqu'à 2030 et diminue après. Concernant l'évolution des facteurs d'entrée, le modèle indique que la productivité du travail s'améliore avec un taux légèrement plus élevé dans les nouveaux Etats membres durant la première moitié de l'horizon de projection.

Le modèle indique par ailleurs que l'efficacité énergétique globale de l'économie augmente par l'effet du progrès technique. L'intensité énergétique des secteurs grands consommateurs d'énergie diminue avec une tendance marquée pour des économies plus orientées vers les services. En général, le modèle suppose qu'à long terme le climat économique demeure positif et que l'UE peut continuer à bénéficier de la globalisation de l'économie.

Les nouveaux états membres sont supposés se développer à un rythme accéléré, en raison de leur restructuration après un ralentissement de leurs économies à la fin des années 90 et le début des années 2000. Cela induit une certaine convergence au sein de l'UE.

Toutefois sur le long terme, avec le déclin de la population en Europe, la croissance économique subira un ralentissement.

Ces prévisions générales de croissance sont alors employées pour en déduire la demande des services énergétiques dans le scénario de référence.

#### **4.1.2. Cas de la France**

Les projections de la demande globale des IGCE ont été élaborées par le groupe des experts sectoriels EDF R&D et ont fait l'objet de consultations approfondies auprès des professionnels des activités industrielles concernées (syndicats professionnels, centres techniques).

Ces hypothèses concernent l'évolution de la production finale et les consommations spécifiques (unitaires).

Les projections sont établies pour 2030 et prolongées jusqu'à 2050 en se basant sur :

- une maîtrise sectorielle large qui intègre les prévisions de croissance de la demande issues des principaux producteurs,

---

<sup>5</sup> Le modèle PRIMES a été développé dans le cadre du programme Joule de la Commission Européenne. Le modèle PRIMES est un modèle d'équilibre partiel conçu pour les perspectives énergétiques, la construction de scénarios et les analyses d'impact de politiques énergétiques [Gusbin, 2004 ; Capros, 1996].

<sup>6</sup> [http://ec.europa.eu/dgs/energy\\_transport/figures/trends\\_2030\\_update\\_2007/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/figures/trends_2030_update_2007/index_en.htm)

- les tendances de croissances des zones géographiques mondiales nettement corrélées à la production en France.

Nous recensons ci-dessous les évolutions des quatre secteurs qui font l'objet de nos simulations (matériaux de construction, verre, acier et papier) [Escarnot, 2007].

### **Évolution de la production des matériaux de construction**

Les principaux clients des cimentiers sont surtout nationaux. Par conséquent, la croissance de la production suit l'évolution de la construction en France, en particulier celle des logements neufs qui représente 24,5% de la consommation en volume. En moyenne, on a supposé une baisse relative de 0,5% par an jusqu'en 2020 puis une stabilité de la production au-delà.

### **Évolution de la production de verre**

Les principaux producteurs de verre plat et creux prévoient une stabilité, voire une faible croissance de leur production à l'horizon 2010. La croissance sur les autres types de verre est plus soutenue

- Verre plat : production en progression de 1% par an jusqu'en 2020 et de 0,5% au-delà.
- Verre creux : production en progression de 1% par an.
- Verre spéciaux : production en progression de 3% par an jusqu'en 2020 et de 1,5% au-delà.
- Fibres de verre : production en progression de 4% par an jusqu'à 2020 et de 1,5% au-delà.

### **Évolution de la production d'acier**

- Production acier filière fonte : production stable jusqu'en 2009, à partir de 2012 baisse due à la fermeture du site de Florange (-2 200 kt/an) et prise en compte d'une augmentation de capacité importante du site de Dunkerque à compter de 2011 (7,5 Mt au lieu de 6,7 Mt dans le scénario bas). Stabilité de 2011 à 2020 et puis baisse de 1% par an jusqu'en 2030 (augmentation des importations de produits semi-finis, les brames, des pays à bas coût).
- Acier électrique : fermeture des aciéries « inox » de l'Ardoise en 2004 et d'Isbergues en 2005 (-850 kt), stabilité de la production jusqu'en 2015 puis production en progression de 1 % par an de 2015 à 2030 (production d'aciers plats par la filière électrique).
- Transformation de bobines laminées à chaud en bobines laminées à froid : stabilité de la production jusqu'en 2015 et augmentation de 1% par an de 2016 à 2030. Dans ce cas on estime que ces tôles, à haute valeur ajoutée, sont élaborées en France.
- Transformation de bobines laminées à chaud en bobines en acier galvanisé : stabilité de la production jusqu'en 2010 puis augmentation de 1% par an de 2010 à 2030.

### **Évolution de la production de papier**

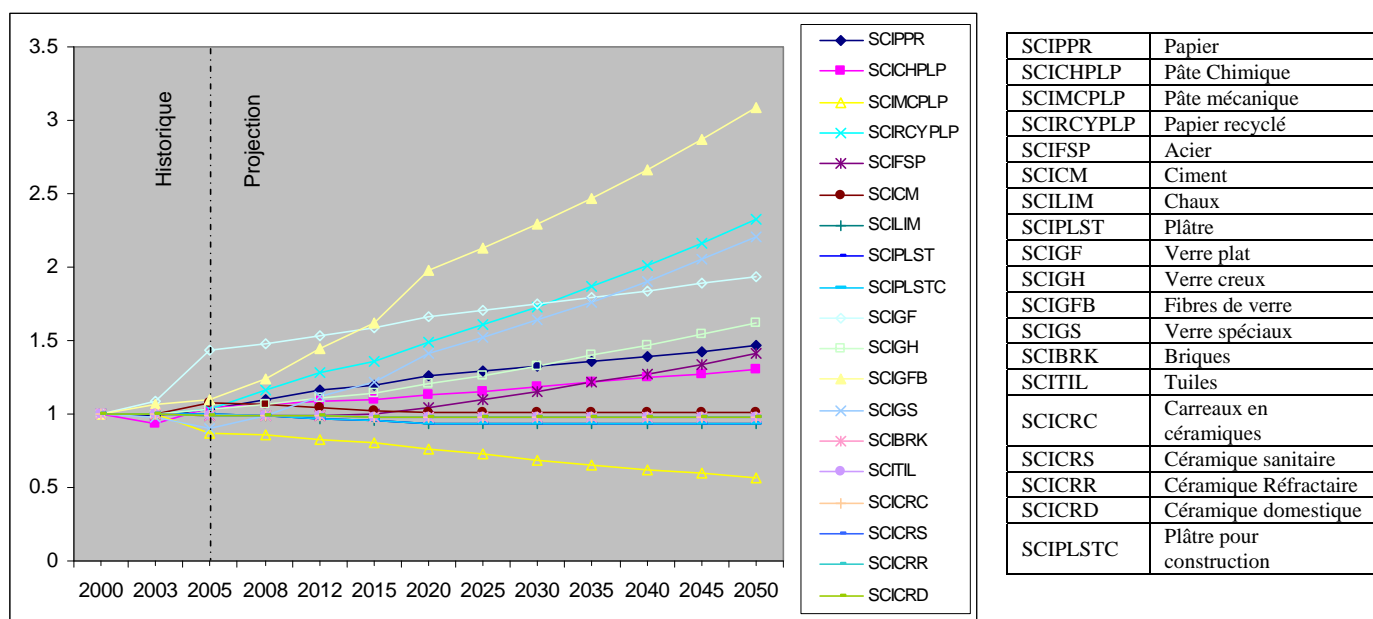
La croissance de la production de papier s'est élevée à plus de 3% par an sur les dix dernières années, tirée par des exportations en forte hausse. Cette tendance devrait se ralentir.

Le marché des pâtes à papier est corrélé au prix de vente coté en bourse. Ce prix fluctue de façon cyclique (baisse de 40% entre fin 2000 et fin 2001) et peut avoir une incidence



importante sur la production. A cet effet, la production de pâte à papier suit une tendance à la baisse, compensée par un recours croissant aux importations. Cette baisse se répercute essentiellement sur la production de pâte mécanique (la plus électro-intensive), alors que la production de pâte chimique reste stable.

- Papier : +2% par an jusqu'en 2010, +1% par an de 2010 à 2020, +0,5% par an au-delà.
- Pâte mécanique : -0,5% par an d'ici 2010, -1% par an au-delà.
- Pâte chimique : 0,5% par an
- Papier recyclé : +4% par an jusqu'en 2010, +2% par an de 2010 à 2020, +1,5% par an au-delà.



**Figure 7 : Scénario de croissance de la demande pour les IGCE en France**

## 4.2. Le prix des matières premières

Dans le tableau ci-dessous sont rassemblés les prix des matières premières employées dans notre modèle des IGCE.

Nous avons recueilli ces valeurs à partir :

- des directions d'approvisionnement des industriels notamment pour le bois et le papier recyclé,
- des données utilisées dans le cadre du projet ULCOS pour le reste des matières premières.

Matière/Année	Unité	2000
Bois	t	28
Papier recyclé	t	18
Pâte à papier	t	600
Minerai	t	24
Ferraille	t	90
DRI	t	118
Oxygène	Nm <sup>3</sup>	0,05
Azote	Nm <sup>3</sup>	0,03
Aggloméré fin	t	10

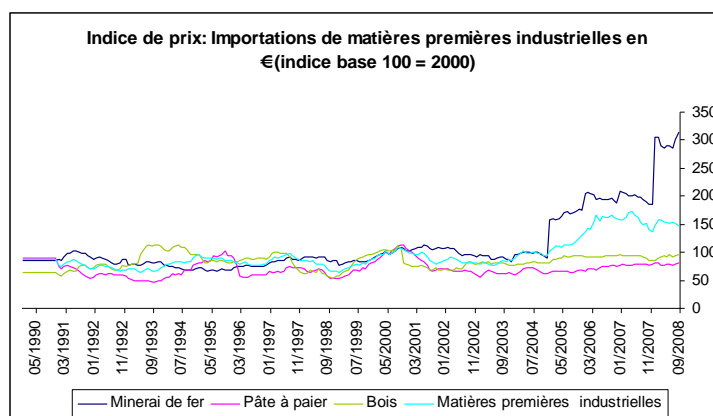
<b>Dolomites</b>	t	90
<b>Pellète</b>	t	39
<b>Kaolin</b>	t	47
<b>Coke</b>	t	106
<b>Gypse</b>	t	40
<b>Hydroxyde de sodium</b>	t	120
<b>Chaux en morceau</b>	t	10
<b>Fonte</b>	t	60

**Tableau 1 : prix de matière premières (€<sub>2000</sub>/t)**

Ces prix correspondent au prix de marché et ne tiennent pas compte des coûts associés au transport. Ils sont exprimés en €<sub>2000</sub> et considérés constants dans le temps.

L'analyse de l'évolution historique liée à l'indice des prix (Figure 8), montre bien le degré d'incertitude relatif à l'établissement de la valeur de cette variable au cours du temps. Par conséquent, établir des séries de projection des variations de prix ne se limite pas à la simple indexation aux valeurs historiques ou à certains indicateurs macro économiques, mais elles requièrent une approche plus approfondie en associant :

- une bonne connaissance du marché (types de matière, usages spécifiques, sources d'approvisionnement),
- l'intégration des particularités de chaque pays (ressources naturelles),
- l'analyse des indicateurs représentatifs pour lesquelles ces prix de matières sont le plus liés.



**Figure 8 : Indice de prix des importations de matières premières pour l'industrie**

### 4.3. Le Taux d'actualisation

Le taux d'actualisation est un élément du calcul économique qui permet de ramener sur une base comparable les coûts et les bénéfices qui sont échelonnés sur plusieurs périodes [Montmarquette, 2007]. En effet, un taux trop élevé aura pour effet de valoriser le présent au

détriment du futur et vice versa <sup>7</sup>[Lebègue, 2005].

La détermination du niveau du taux d'actualisation à utiliser est un élément à la fois complexe et délicat. Excepté la valeur prise dans les calculs économiques qu'effectue l'Etat, il n'existe pas de valeur standard sur laquelle se référer. Le taux d'actualisation peut varier pour chaque secteur, voire même pour chaque entreprise selon ses objectifs, sa préférence forte ou modérée pour le présent au détriment du futur, ainsi que la prime de risque accordée aux investissements futurs.

Dans ce contexte, nous suggérons un taux d'actualisation pour l'industrie de 5%<sup>8</sup>, ce qui est cohérent avec le taux d'actualisation de la DGEMP. Le taux choisi est unique et constant<sup>9</sup>. Il s'applique de manière uniforme à tous les projets d'investissement considérés, pour tous les secteurs d'activité ainsi qu'à tous les pays.

Le taux nominal utilisé en France jusqu'en septembre 2005 avait été fixé à 8% par le CGP<sup>10</sup> en 1985 [Delattre, 2005]. Plusieurs facteurs plaidaient en faveur d'une révision à la baisse de ce taux, ce qui a été fait. Il est maintenant fixé à 4% [Lebègue, 2005]. Par ailleurs, nous constatons une variation des taux utilisés dans d'autres pays qui peut aller de 3 à plus de 10 %.

#### 4.4. Hypothèses d'ordre général

##### Les facteurs d'émissions de CO<sub>2</sub>

En référence à l'IPCC et l'ADEME les facteurs d'émissions (Femis) retenus dans cette étude sont les émissions spécifiques répertoriées dans l'arrêté du 28 juillet 2005 relatif à la vérification et à la quantification des émissions déclarées dans le cadre du système d'échange de quotas d'émissions de gaz à effet de serre. Voir le tableau ci-dessous :

Combustible	PCI sur brut (TJ/t x10 <sup>3</sup> )	Femis (tCO <sub>2</sub> /TJ)	FE (tCO <sub>2</sub> /MWh)
Charbon à coke			
Charbon à vapeur	26	95	0,34
Charbon sous bitumeux	20	96	0,35
Agglomérés de houille	32	95	0,34
Lignite	17	100	0,36
Briquettes de lignite	17	98	0,35

<sup>7</sup> Cette définition est largement controversée « le choix du coefficient de préférence pure pour le présent, importe moins que les hypothèses sur la croissance, sur la productivité du capital, sur les préférences des agents et sur leurs croyances vis-à-vis des dommages climatiques » [Hourcade, 2004].

<sup>8</sup> Le taux de 5% part de l'hypothèse que 4% est un taux légèrement faible.

<sup>9</sup> Le rapport du plan suppose un taux d'actualisation décroissant pour les évaluations qui portent sur le très long terme, cette baisse serait effective à partir de 30 ans et limitée par un plancher fixé à 2% [Lebègue, 2005].

<sup>10</sup> Commissariat Général du Plan.

Coke de houille	28	107	0,39
Coke de lignite	17	108	0,39
Coke de pétrole	32	96	0,35
Tourbe	11,6	110	0,40
Ordures ménagères	8,8	96	0,35
Pneumatiques	26	85	0,31
Plastiques	23	75	0,27
Pétrole brut	42	73	0,26
Fioul lourd commercial	40	78	0,28
Fioul domestique	42	75	0,27
Naphta	45	73	0,26
Huile de schiste bitumeux	36	73	0,26
Solvants usagés			
Gaz naturel	49,6 (type H) 38,2 (type B)	57	0,21
Gaz naturel liquéfié		57	0,21
Gaz de pétrole liquéfié		64	0,23

**Tableau 2 : Les facteurs d'émissions de CO<sub>2</sub> des combustibles (valeur par défaut)**

Matière	Teneur en Carbone	Emissions de CO <sub>2</sub>
Dolomite Brulée	0,0065 t/t	0,0238 t/t
Acier	0,0004 t/t	0,0015 t/t
Ferraille	0,0004 t/t	0,0015 t/t
Minerai	0,0005 t/t	0,0018 t/t
Chaux Brulée	0,0065 t/t	0,0238 t/t
Pellets	0,0001 t/t	0,0004 t/t
Chaux en morceaux	0,1200 t/t	0,44 t/t
Aggloméré	0,0001 t/t	0,0004 t/t
DRI	0,0200 t/t	0,0733 t/t
Electrodes	0,9999 t/t	3,6663 t/t
Fonte	0,0478 t/t	0,1753 t/t
Coke	0,8800 t/t	3,226 t/t

Gaz de Cokerie	0,012 t/GJ	0,160 t/MWh
Gaz de Haut fourneau	0,074 t/GJ	0,977 t/MWh
Gaz de Convertisseur	0,046 t/GJ	0,611 t/MWh

Source : ULCOS

**Tableau 3 : Les facteurs d'émissions de CO<sub>2</sub> pour les autres matériaux (valeur par défaut)**

Pays	gCO <sub>2</sub> / kWh avec les pertes (7%)
Allemagne	690,85
Autriche	188,46
Belgique	362,67
Bulgarie	pas de données
Chypre	pas de données
Danemark	670,58
Espagne	526,65
Estonie	0,00
Finlande	278,99
France	58,00
Grèce	1098,13
Hongrie	679,56
Irlande	818,28
Italie	693,53
Lituanie	pas de données
Lettonie	pas de données
Luxembourg	727,42
Malte	pas de données
Pays-Bas	728,42
Pologne	1141,27
Portugal	632,17
République Tchèque	970,06
Roumanie	pas de données
Royaume-Uni	589,41
Slovaquie	342,84
Slovénie	425,82
Suède	38,13

Source : EDF

**Tableau 4 : Contenu de CO<sub>2</sub> du kWh électrique par pays**

## Les coûts d'investissement, les coûts fixes et variables

Dans le cas de l'industrie du papier, nous n'avons pu renseigner les coûts fixes et les coûts variables de certaines technologies. Nous avons donc procédé à une approximation. Pour le coût variable<sup>11</sup> nous avons pris 2% de l'investissement et 5% pour les coûts fixes. Cette approximation est basée sur la part moyenne des coûts fixes et variables par rapport aux investissements des technologies renseignées.

## Le prix des autres énergies hors pétrole, gaz naturel, charbon, électricité

Les projections de prix des combustibles (énergies fossiles) dans le scénario facteur 4, sont nettement inférieures aux prix des combustibles du scénario tendanciel. Cet écart s'explique par une faible demande d'énergies fossiles due à la forte contrainte sur les émissions de CO<sub>2</sub>. Cependant, nous considérons le comportement de la demande de biomasse (étant une énergie propre) comme l'inverse de celui des combustibles fossiles, donc un prix élevé soutenu par une forte demande. Par conséquent, les projections de prix de la biomasse dans les différents scénarios ont été conçues de la manière suivante :

- dans le scénario tendanciel, elles suivent la moyenne annuelle des valeurs historiques du prix de la biomasse (source EDF),
- dans le scénario avec taxe elles suivent la moyenne des projections des autres combustibles (charbon, pétrole, gaz naturel),
- dans le scénario facteur 4, elles suivent les projections de prix de l'électricité.

Pour les prix du fioul lourd, GPL et coke de pétrole, l'écart est calculé sur la base des séries de prix de la France et de l'UE publiés par la DGEMP.

Le prix du fuel ( $P_{X_{FOL}}$ ) suit les mêmes tendances que le prix du pétrole ( $P_{X_{OIL}}$ ).

$$P_{X_{FOL}} = P_{X_{OIL}}$$

Le prix du GPL ( $P_{X_{GPL}}$ ) suit les mêmes tendances que le prix du pétrole majoré de 50%.

$$P_{X_{GPL}} = P_{X_{OIL}} \times (1 + 50\%)$$

Le prix du coke de pétrole ( $P_{X_{COKP}}$ ) suit le prix du pétrole minoré de 30%

$$P_{X_{COKP}} = P_{X_{OIL}} \times (1 - 30\%)$$

## Les facteurs de conversion

Les facteurs de conversions énergétiques retenues sont :

- les facteurs de conversions de conservatoire de l'énergie<sup>12</sup>,

<sup>11</sup> Coûts variables des opérations de maintenance. Ce coût ne contient pas les coûts variables additionnels de matières premières et d'énergie.

<sup>12</sup> <http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/methodconv.htm>

- la nouvelle méthodologie d'établissement de bilan énergétique de la France<sup>13</sup>.

Pour les conversions monétaires Euro/Dollars on a retenu le facteur 1,25.

## 5. Scenarios de prix des énergies : hypothèses retenues

Les projections de prix utilisées sont issues du modèle POLES<sup>14</sup>. Les prix retenus sont spécifiques à chacun de nos scénarii et seront développés après avoir dressé les hypothèses générales qui ont permis leur construction dans le modèle POLES [Criqui, 2006 ; Rynkiewicz, 2005].

L'ensemble des hypothèses retenues dans la construction des scénarios de prix dans POLES reflète une image possible de l'évolution du monde de l'énergie à l'horizon 2050, sur la base d'un ensemble d'indicateurs probables compte-tenu des contraintes actuellement connues.

Le Tableau 5 résume les hypothèses macro-économiques et démographiques retenues pour l'élaboration des scénarios de prix. Selon POLES l'ensemble de ces hypothèses est défini pour chacune des régions spécifiquement prises en compte dans le modèle. Le ralentissement de la croissance démographique mondiale relève de dynamiques contrastées, pour certaines régions la population décroît, notamment en Chine et en Europe et pour d'autres elle augmente (Afrique). De même, la forte croissance du PIB mondial reflète une croissance économique beaucoup plus rapide dans les pays en développement que dans les pays industrialisés, mais avec également une décélération très marquée de la croissance en Chine, due au vieillissement attendu de la population<sup>15</sup>.

Indicateurs Clefs						Croissance (%/an)		
	1990	2001	2010	2030	2050	1990/2010	2010/2030	2030/2050
Population (Milliards)	5,2	6,1	6,8	8,1	8,9	1,3%	0,9%	0,5%
PIB (M€)	29 880	42 224	59 524	105 930	164 090	3,5%	2,9%	2,2%
PIB par habitant (€)	5 697	6 907	8 764	13 107	18 513	2,2%	2,0%	1,7%

Source : POLES (Le PIB est exprimé en euro constants de 1999)

**Tableau 5 : Les hypothèses exogènes des scénarii de prix de POLES**

Nous avons préféré utiliser les prévisions de prix des énergies issues du modèle POLES pour nos deux études (Europe et France) car ils sont estimés sur tout l'horizon de l'étude et non prolongés.

Dans le cas de l'Europe, nous aurions pu prendre pour nos simulations des prix issus de PRIMES pour être cohérent avec les projections de demande effectuées par GEM-E3. Cependant, les tendances entre 2030 et 2050 étant trop basses en terme de prix des énergies, nous avons volontairement laissé un biais dans la cohérence entre la demande calculée et les prix des énergies.

<sup>13</sup> <http://energie.cnrs.ensma.fr/ace/nvelle.doc>

<sup>14</sup> Prospective Outlook on Long term Energy Systems, développé par le LEPII (laboratoire de recherche en économie et politiques énergétiques de Grenoble)

<sup>15</sup> Extrait des hypothèses retenues selon les arguments du modèle POLES

Les résultats de nos scénarios prospectifs s'en trouveront améliorés du fait de la prise en compte de prix plus réalistes dans le contexte actuel. En outre, pour le cas de la France seul, la cohérence est assurée.

Par ailleurs, nous ne pouvions utiliser de scénarii de demande calculés avec d'autres prix car ce type de résultats n'est pas à notre disposition.

## 6. Description des scénarios pour l'analyse

Nous présentons dans cette partie les 3 scénarii qui vont servir à réaliser nos simulations. Chacun de ces scénarii comporte un scénario de prix adapté à sa situation (reflétant une taxe CO<sub>2</sub>, une borne d'émission...) auquel nous ajoutons le scénario de contrainte permettant d'illustrer une situation, un choix politique ou économique (Marché de CO<sub>2</sub>, facteur 4...).

### 6.1. Le scénario tendanciel (SCTend)

Le terme tendanciel est l'équivalent français de « Business as Usual » de l'AIE. Il s'agit d'un scénario de prospective où les évolutions futures de l'économie sont conformes aux tendances du passé et où aucune politique nouvelle n'est adoptée.

Qualifié de théorique, le scénario tendanciel est essentiellement destiné à servir d'étalon à partir duquel on peut mesurer les écarts nécessaires par rapport aux objectifs allant au-delà des mesures déjà prises. Ce scénario ne tient pas compte des engagements internationaux (Kyoto) et de la directive européenne sur les quotas d'émission, donc aucune contrainte environnementale n'est imposée.

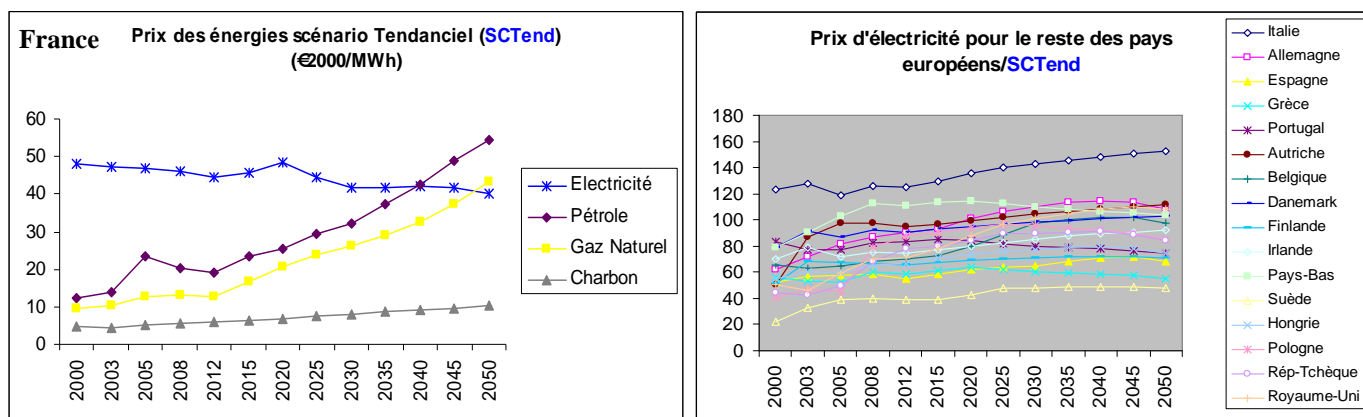
#### ➤ Les prix des énergies retenus

Il a été adapté à ce scénario les prix des énergies issues du scénario tendanciel de POLES. Les hypothèses des politiques environnementales prises en compte dans le cadre du scénario tendanciel de POLES ne supposent pas un accord international sur le climat, mais résultent plutôt d'une prise de conscience croissante de la nécessité de lutter contre le changement climatique. Il entend simplement représenter des politiques climatiques à minima, différenciées par région en supposant deux variantes :

- Des prix sur la base de l'hypothèse selon laquelle l'Europe demeure la région montrant la volonté d'action la plus forte. La valeur-carbone de cette région est fixée de façon exogène à 10 €/tCO<sub>2</sub> en 2010 (pour l'ensemble de l'économie) puis elle augmente linéairement jusqu'à 30 €/tCO<sub>2</sub> en 2050. Les autres pays industrialisés sont supposés adopter des mesures plus modérées. Ceci se traduit par une valeur-carbone inférieure de moitié à celle de l'Europe (5 €/tCO<sub>2</sub> en 2010) augmentant linéairement pour atteindre 15 € en 2050.
- Des prix sur la base d'aucune contrainte environnementale.

Dans notre scénario tendanciel (SCTend) nous avons choisi la deuxième alternative (aucune contrainte environnementale n'est appliquée). Les projections des prix de combustibles sont estimées sur la base du prix sur le marché européen, donc les prix sont supposés égaux pour tous les pays européen, les mêmes que pour la France. Néanmoins les projections de prix de l'électricité sont différenciées par pays.





**Figure 9 : Scénario de prix des énergies scénario tendanciel pour la France et le reste de L'Europe (€<sub>2000</sub>/MWh)**

## 6.2. Le scénario environnemental post Kyoto (SCATax)

Le scénario dit « environnemental » est un scénario intermédiaire entre le tendanciel et le facteur 4. Partant de l'hypothèse qu'aucune politique environnementale n'est encore officiellement adaptée pour la période post Kyoto [Mocilnikar, 2007], ce scénario, permet de poser les premiers jalons de la simulation d'une politique environnementale au delà de 2012.

La politique environnementale adaptée est celle d'une taxe sur les émissions de CO<sub>2</sub> à partir de 2013. L'intérêt de ce scénario est d'estimer l'impact d'un coût supplémentaire lié aux émissions de CO<sub>2</sub> sur les choix technologiques de l'industrie (IGCE). Ce choix s'inspire du coût carbone qui sera appliqué à un contingent important des émissions de gaz à effet de serre (notamment le CO<sub>2</sub>) relatif à la révision du système européen d'échange de quotas d'émission à partir de 2013. Durant cette période les quotas d'émission seront mis aux enchères<sup>16</sup>. En effet, la révision de ce marché impliquera un coût de carbone supplémentaire dont le niveau sera fixé via la loi de l'offre et de la demande entre les différents opérateurs économiques concernés par ce marché. Le coût sera d'autant plus élevé que la disponibilité des quotas est restreinte sur le marché.

La contrainte environnementale retenue dans le cadre de ce scénario est l'application d'une taxe constante à 50 €/t de CO<sub>2</sub> émise (aucune taxe n'est appliquée entre 2000 et 2012), soit la moitié de la pénalité de la seconde période. Le choix de cette taxe est arbitraire et ne dépend d'aucune estimation économique ou avis d'experts. Ce choix est considéré comme un niveau suffisant pour que les secteurs industriels commencent à réagir et il nous permet une bonne sollicitation de notre modèle.

<sup>16</sup> Deux tiers des quotas seront mis aux enchères à partir de 2013 et la totalité en 2020, en dehors de l'hypothèse d'une attribution gratuite pour les secteurs très susceptibles d'être exposés à des fuites de carbone.

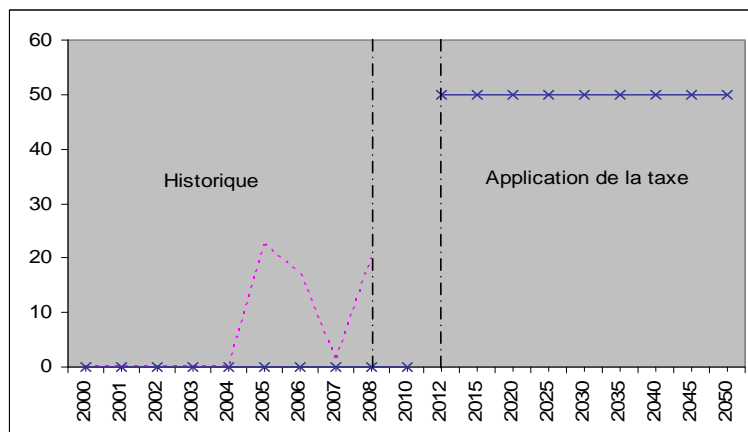
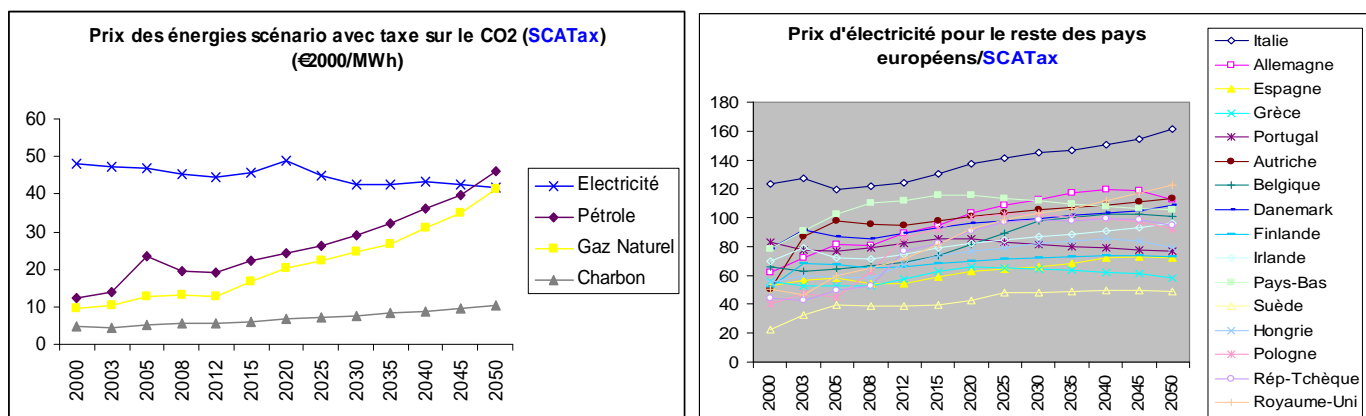


Figure 10 : Taxe sur le CO<sub>2</sub> appliquée aux secteurs industriels (€/t)

### ➤ Les prix des énergies retenus

Le scénario de prix des énergies retenu dans le cadre de ce scénario est le scénario avec taxe de POLES qui suppose un accord international sur le climat et un prix de la tonne de CO<sub>2</sub> qui augmente linéairement par morceaux pour s'établir à 50 €/t en 2050.



Source : POLES

Figure 11 : Scénario de prix des énergies pour la France et le reste des pays européens  
scénario avec une taxe sur le CO<sub>2</sub> (€/2000/MWh)

## 6.3. Le scénario facteur 4 (SCBND, SCBNDT)

Le facteur 4 est un concept introduit par Ernst Ulrich von Weizsäcker, Amory B. Hunter et L. Hunter Lovins dans un rapport au club de Rome, publié en 1997 [Weizsäcker, 1997]. Il se réfère à une augmentation par deux du bien-être, tout en divisant par deux l'utilisation des ressources naturelles [Tuddenham, 2006]. Il s'agit donc à l'origine d'un concept plus large que la seule dimension des GES. L'idée qui a été reprise dans le cadre des émissions de GES consiste à stabiliser la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> à 450 ppm<sup>17</sup>[DGEMP, 2005].

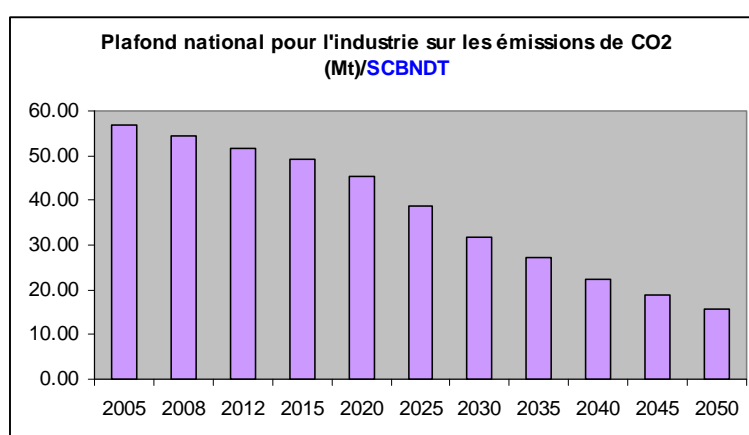
<sup>17</sup> Concentration maximale pour atteindre l'objectif de rester en dessous de 2°C. Selon le GIEC, à ce niveau de concentration la croissance de la température s'établirait entre 1,3 et 3,9°C. L'objectif pour tous les gaz effet de serre (GES) est de 550

Pour atteindre cet objectif, il faut réduire les émissions annuelles en 2050 à 4 Gt, soit, pour la France un quart de ses émissions actuelles avec une répartition proportionnelle au nombre d'habitants<sup>18</sup>.

Afin de modéliser un facteur 4 à l'horizon 2050, nous avons borné les émissions de l'ensemble des IGCE (scénario SCBNDDT), ou pour chaque secteur individuellement (scénario SCBND), selon la chronologie suivante :

Premièrement, pour être conforme à l'objectif de moins 20% des émissions de GES (CO<sub>2</sub>) proposé par l'UE pour 2020, nous avons appliqué 20% de réduction des émissions par rapport aux quotas de 2005<sup>19</sup>.

Ensuite, au-delà de 2020, nous appliquons une baisse de 30% tous les 10 ans pour atteindre le facteur 4 en 2050 [Chambolle, 2004]. Le facteur 4 constitue donc un véritable défi qui doit engager des efforts considérables dans tous les secteurs.



Source : PNAQ

**Figure 12 : Scénario facteur 4 national pour l'industrie (plafond sur les émissions de CO<sub>2</sub>) pour l'ensemble de l'industrie (MtCO<sub>2</sub>)**

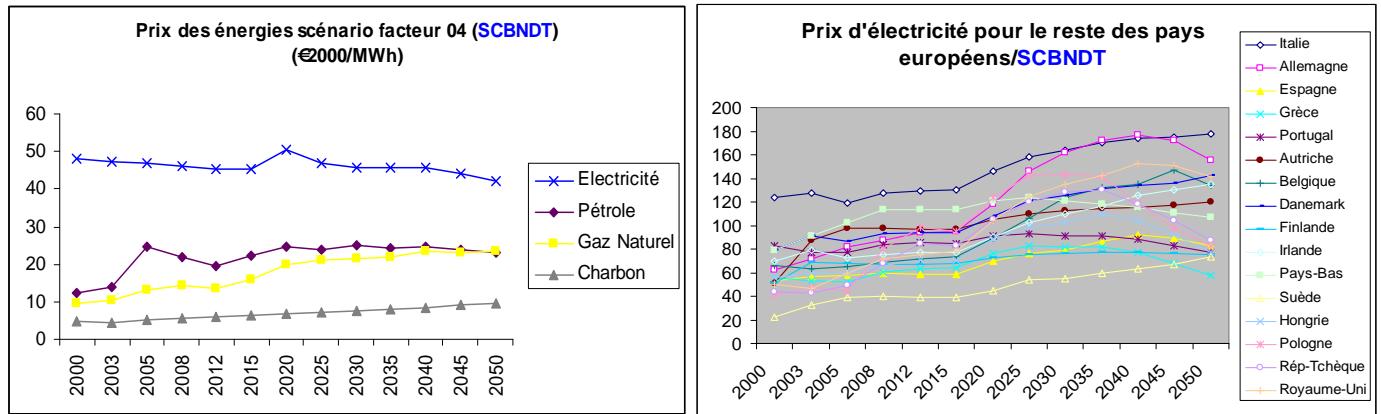
### ➤ Les prix des énergies retenus

Les prix retenus dans le cadre de ce scénario sont ceux du scénario facteur 4 du modèle POLES qui résulte d'une forte contrainte environnementale.

ppm.

<sup>18</sup> Pour une population actuelle de 6,7 milliards d'habitants, 4 Gt sera l'équivalent de presque 0,6 t de carbone par habitant. Pour 64 millions d'habitants en France cela représentera un peu plus de 38 Mt. Les émissions de la France en 2006 représentent 140 Mt de Carbone [Boissieu, 2006].

<sup>19</sup> Le rapport de la commission énergie « perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050 » stipule que la référence sur laquelle se base le calcul du Facteur 4 est le résultat d'émissions obtenu en 2005 et non ceux des quotas. Même si les résultats d'émissions sont inférieurs aux quotas, la démarche de se baser sur les quotas pour la réalisation du Facteur 4 est fondée sur l'hypothèse que les secteurs sont autorisés à émettre au niveau des émissions du PNAQ.



**Figure 13 : Scénario de prix des énergies pour la France et le reste des pays européens  
scénario facteur 4 (€/2000/MWh)**

Après avoir exposé l'ensemble de la démarche et les hypothèses exogènes retenues pour la réalisation de nos projections, nous allons procéder maintenant à la présentation des résultats issus de ces scénarios et leur analyse.

## 7. Principaux résultats d'ensemble

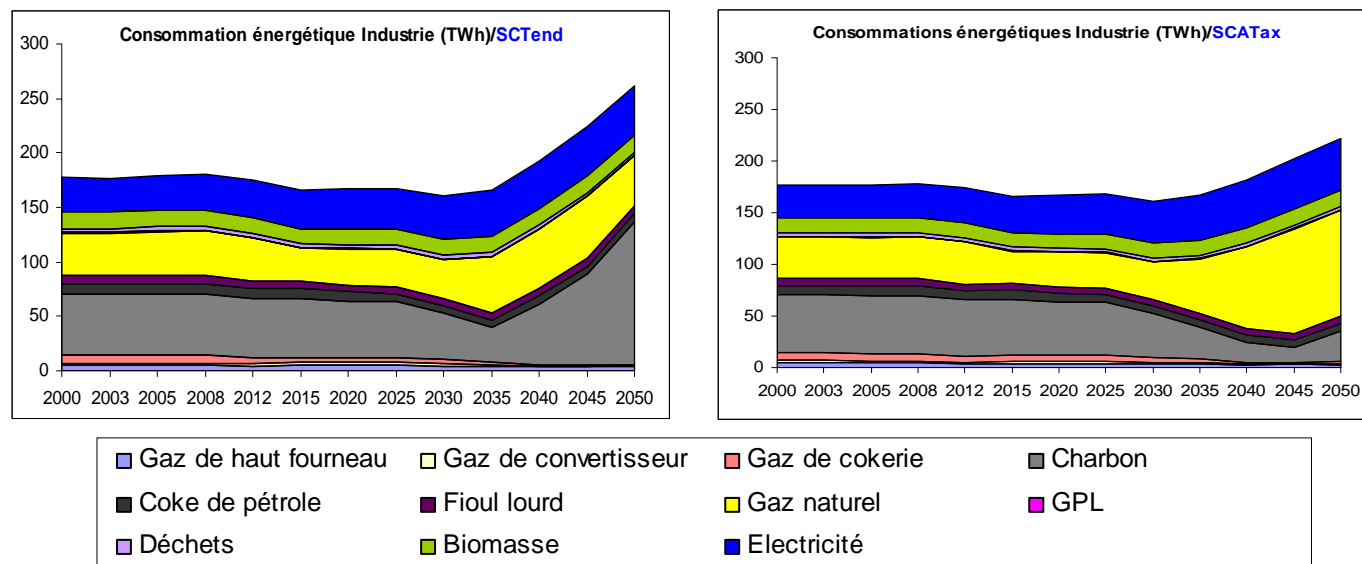
Dans un premier temps, nous allons comparer, dans le cas de la France, les résultats obtenus pour notre scénario avec taxe, à ceux obtenus pour notre scénario tendanciel. Nous exposerons les différentes consommations d'énergies, puis nous étudierons les effets de la taxe CO<sub>2</sub> sur la structure des IGCE.

Ces résultats nous serviront à montrer le potentiel de notre modélisation dans l'aide à la décision d'investissements et dans l'étude de sensibilité aux variations des entrées du modèle (niveau de demande, niveau de taxe...).

Dans une deuxième partie nous procéderons aux mêmes analyses pour le scénario facteur 4.

## 7.1. Scenario avec taxe carbone (SCATax) : Des consommations énergétiques orientées vers le gaz naturel

### 7.1.1. Profil d'évolution des consommations énergétiques

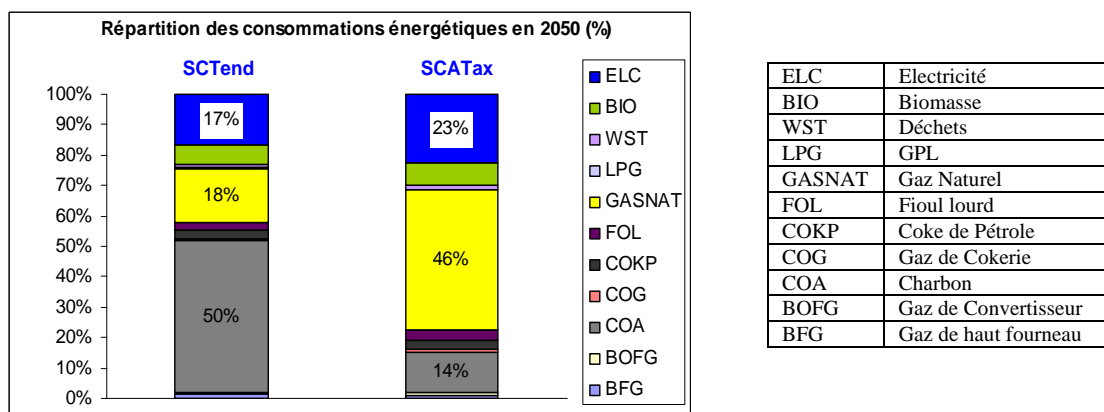


**Figure 14 : Consommation énergétique des IGCE (TWh), scénario tendanciel et avec taxe**

Pour nos deux premiers scénarios (tendanciel, avec taxe carbone), le graphe (Figure 14) montre l'évolution des consommations énergétiques des IGCE par type d'énergie à l'horizon 2050. On constate une forte variation dans le mix énergétique des IGCE sous l'effet d'une taxe carbone. Le gaz naturel s'impose au détriment du charbon. Son accroissement est notable à partir de 2030.

- La consommation de gaz naturel passe de 40 TWh en 2000 pour s'établir à 102 TWh en 2050 soit une augmentation de 150%.
- Celle du charbon est caractérisée par une baisse de 86%, elle passe de 56 TWh en 2000 pour s'établir à 30 TWh en 2050.
- La part d'électricité passe de 32 TWh en 2000 à 50 TWh en 2050 soit une augmentation de 59%.

Au total, le mix énergétique final se transforme plus sur les 20 dernières années qu'entre 2000 et 2030 où la part du gaz naturel sur l'ensemble des combustibles passe de 18% dans le scénario tendanciel à 46% sous l'effet d'une taxe en 2050 (Figure 15). Ceci est l'observation brute des résultats, les paragraphes suivants apportent un éclairage sur les chiffres calculés.

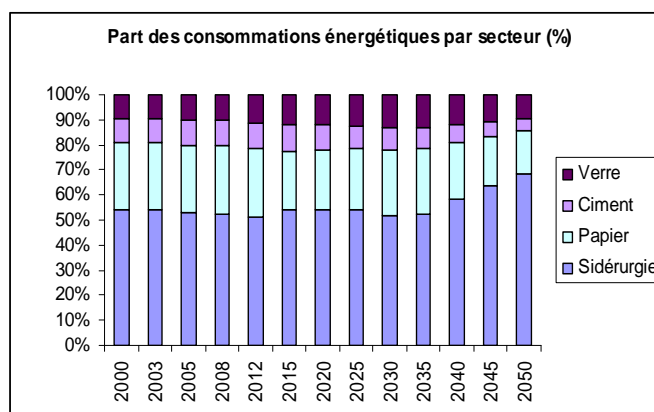


**Figure 15 : Répartition des consommations énergétiques des IGCE en 2050, scénario tendanciel et scénario avec taxe**

### 7.1.2. La structure des consommations énergétiques des IGCE est tirée globalement par la sidérurgie

L'effet de variation des consommations énergétiques est dû à la restructuration technologique au sein des secteurs industriels.

Après l'analyse des résultats, on a constaté que la sidérurgie représente une part prépondérante dans les consommations énergétiques des IGCE (Figure 16). Par conséquent, une simple variation de ce secteur pourra entraîner un impact important sur l'ensemble des IGCE. De ce fait, il est important de porter un regard particulier sur la structure technologique de cette industrie.



**Figure 16 : le poids de la sidérurgie dans les consommations énergétique des IGCE**

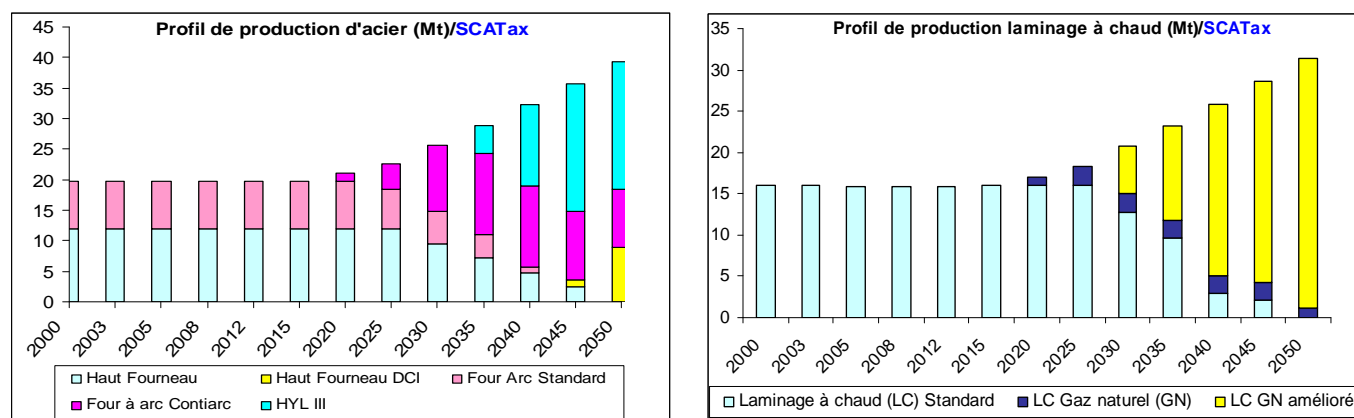
#### ➤ La structure technologique de la sidérurgie

La taxe sur les émissions de CO<sub>2</sub> implique un coût supplémentaire pour les industriels, donc elle privilégie les technologies moins émettrices en CO<sub>2</sub>. Par conséquent, la restructuration technologique en dépend fortement.

La reprise du gaz naturel au détriment du charbon, telle que constatée sur le profil des consommations énergétiques des IGCE, est majoritairement due aux éléments suivants (Figure 17) :

- remplacement de la filière de production d'acier classique (forte consommatrice en charbon<sup>20</sup>) par la filière de réduction directe notamment le procédé HYL III (Voir Annexe 2) fort consommateur en gaz naturel,
- usage du gaz naturel dans le laminage à chaud par le manque de disponibilité des gaz sidérurgiques liés à la filière fonte classique.

L'accroissement accéléré à partir de 2030 s'explique par l'hypothèse soutenue du renouvellement du parc de production à l'horizon 2030. Cela a permis une émergence plus rapide de capacités importantes de certaines nouvelles filières tirées par des coûts de production plus avantageux.



**Figure 17 : Structure technologique de l'industrie sidérurgique (Mt) dans le cas d'une taxe sur le CO<sub>2</sub>**

L'accroissement de la filière four à arc dominée par le procédé Contiarco (caractérisé par des consommations électriques nettement inférieures au four à arc classique) entraîne la hausse des consommations électriques. L'émergence de la filière four à arc (électrique) au détriment de la filière fonte classique est limitée par la contrainte sur la disponibilité de la ferraille.

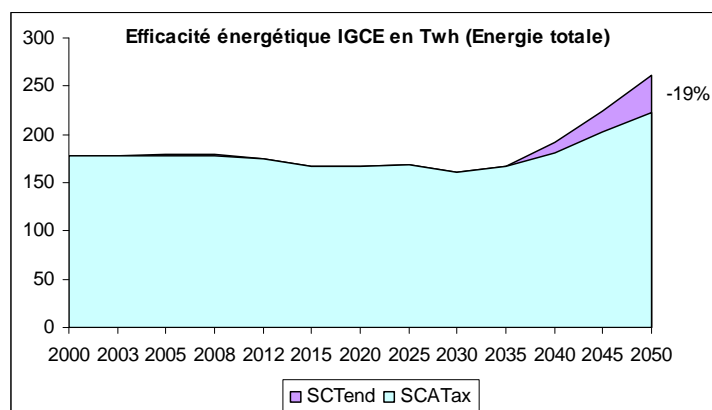
La reprise de la filière fonte en 2050 est marquée par la pénétration du haut fourneau avec injection directe de charbon (Haut fourneau DCI). Ce type de procédé permet d'augmenter la part du charbon injectée au détriment du coke, ce qui implique des consommations énergétiques et des émissions de CO<sub>2</sub> moindres.

### 7.1.3. Les IGCE ont réalisé des efforts d'économie d'énergie

L'application d'une taxe sur les émissions de CO<sub>2</sub> a permis des réductions de consommations énergétiques dans l'ensemble des IGCE. Cette réduction, perceptible à partir de 2035, s'établit pour l'ensemble de l'industrie à moins 19% en 2050 par rapport au scénario tendanciel (voir Figure 18). La légère baisse constatée entre 2005 et 2008 est due à l'arrêt de l'utilisation de la chaleur produite pour la production d'électricité dans le secteur de la sidérurgie, cela a fait baisser le niveau de consommation de chaleur et entraîné l'arrêt des chaudières à gaz.

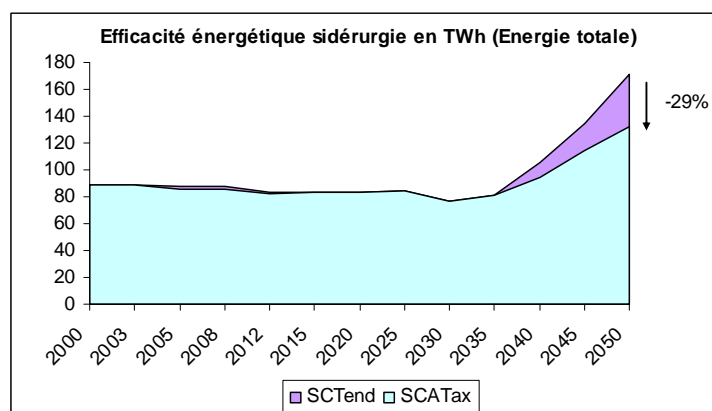
<sup>20</sup> Filière à forte émissions en CO<sub>2</sub>, donc un impact carbone plus important sur les coûts de production

Cependant, nous n'avons pas pris en considération dans notre modèle le rachat par EDF de l'autoproduction d'électricité au sein de l'industrie. Les tarifs de rachat sont compétitifs, ce qui peut largement influencer la décision finale dans les choix d'investissements.



**Figure 18 : Effort d'économie d'énergie (toutes énergie confondues) réalisé par les IGCE (TWh) scénario avec taxe**

Le niveau d'économie d'énergie réalisé par l'ensemble des IGCE est majoritairement dû aux efforts réalisés dans la sidérurgie (Figure 19).



**Figure 19 : Les économies d'énergie réalisées dans la sidérurgie**

Nous remarquons aussi que les autres secteurs industriels ont réalisé des économies d'énergie grâce au seul effet des prix des énergies (sans l'application d'une taxe). Cela s'explique par la structure des consommations énergétiques des technologies des autres industries qui reste homogène, avec une consommation moindre dans les nouvelles technologies (par exemple, un four à clinker avec préchauffeur et précalcinateur pour la production du clinker par la voie sèche consomme les mêmes types de combustibles que le four à clinker standard avec des quantités moins importantes). Cependant, dans le cas de la sidérurgie la structure énergétique des technologies est très variable (procédés électriques, procédés à gaz et procédés à charbon), donc une contrainte d'un coût supplémentaire peut engendrer de fortes variations dans les procédés de fabrication, ce qui induit une forte variabilité dans les consommations énergétiques globales des IGCE.

L'application d'une taxe n'a pas influencé la structure technologique des autres secteurs industriels mais leur coût marginal de production a augmenté (Figure 20).

En effet, le changement de technologies qui a permis une baisse des émissions de CO<sub>2</sub> a entraîné un coût d'investissement supplémentaire, qui se traduit globalement par la hausse du



coût marginal de production, car nous sommes aux mêmes prix des énergies et à consommation spécifique inférieure.

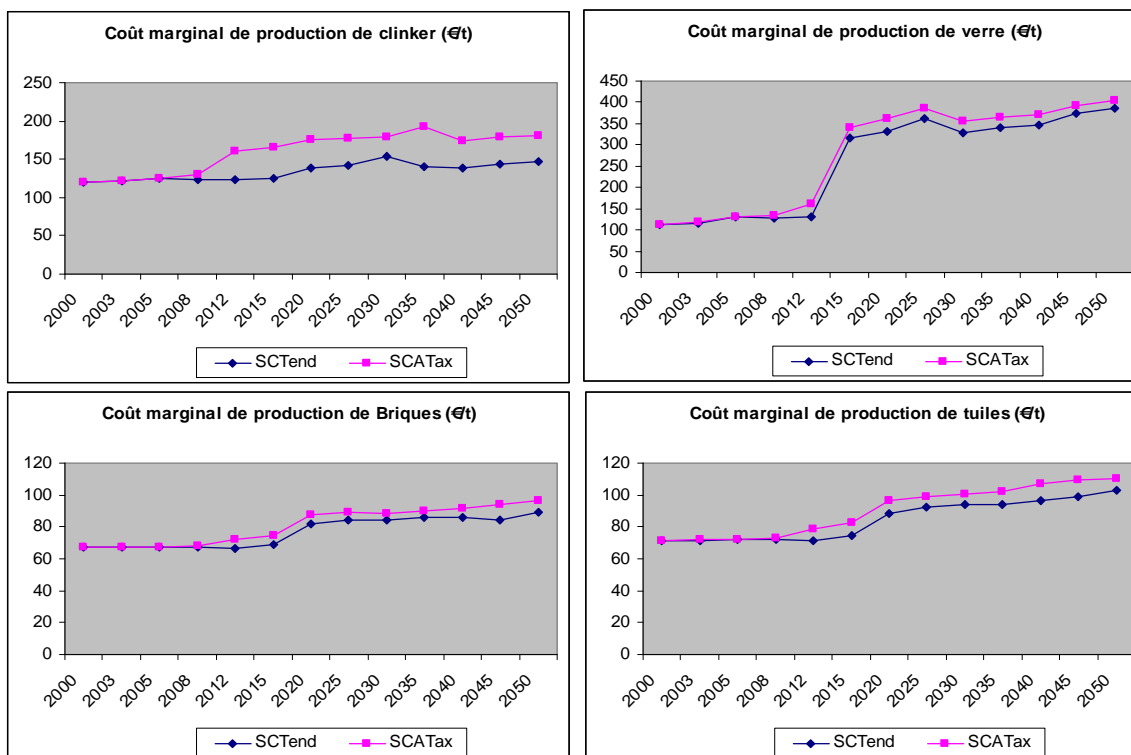


Figure 20 : Coût marginal de production industriel scénario avec taxe

### ➤ Les autres secteurs industriels ont réalisé des économies d'énergie

Le fait que le modèle n'ait pas choisi systématiquement de faire appel à de nouvelles technologies (technologies énergétiquement efficaces) dans les autres secteurs industriels, montre que ces secteurs ont réalisé naturellement des efforts d'économie d'énergie<sup>21</sup>. Nous voyons ci-dessous la part due aux nouveaux investissements et celle due à une meilleure efficacité énergétique dans les 3 autres secteurs étudiés (Figure 21, Figure 22, Figure 23).

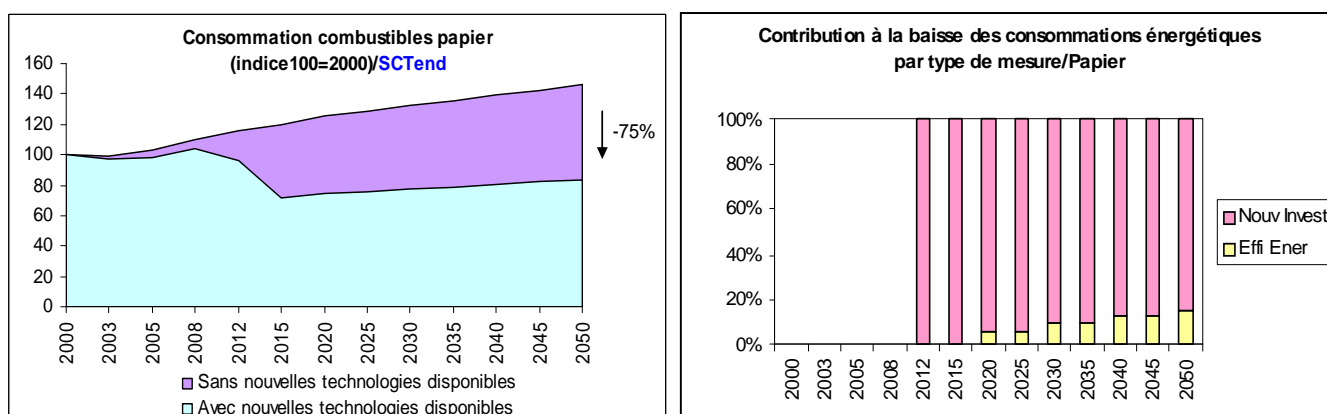
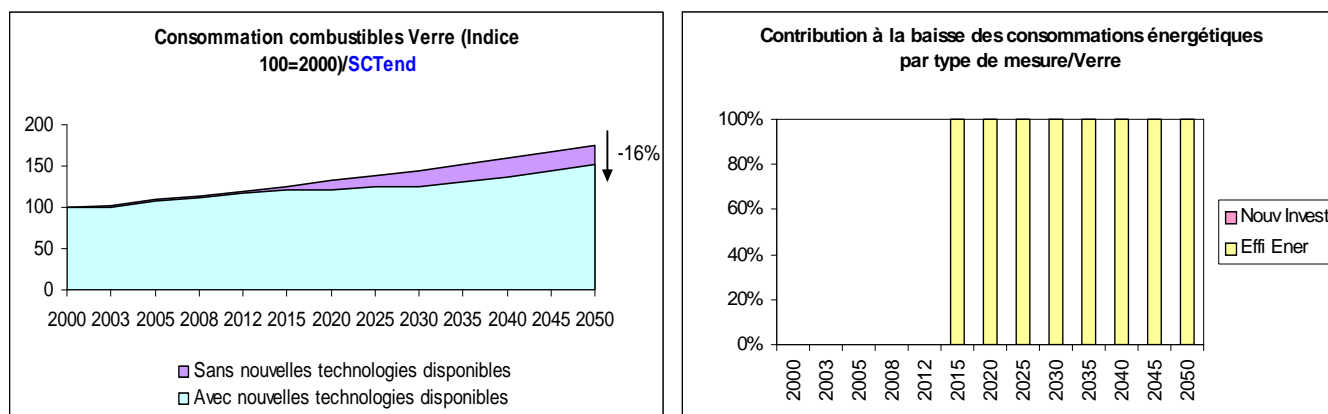
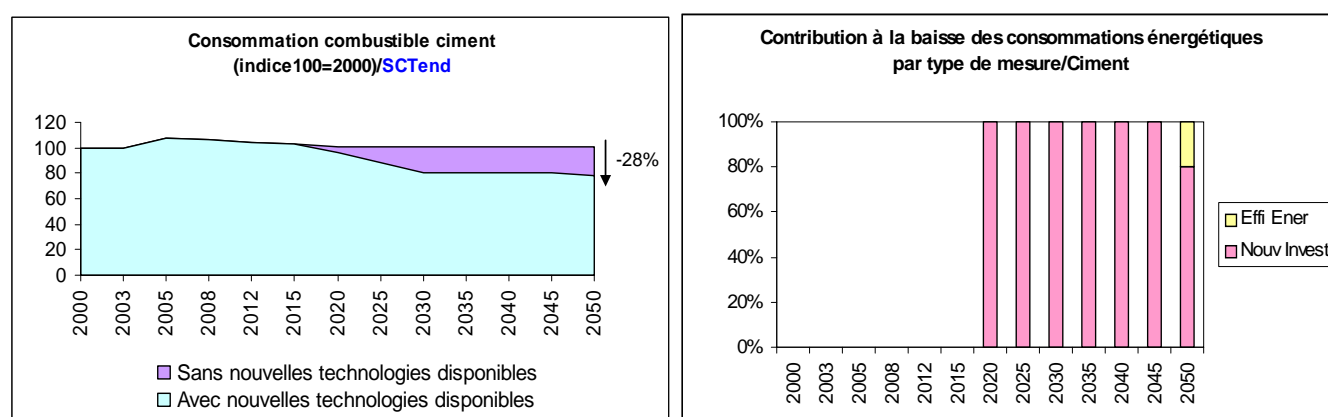


Figure 21 : Efforts d'économie d'énergie de l'industrie du papier

<sup>21</sup> L'hypothèse retenue est de considérer le ratio de consommation spécifique à l'année de référence constant le long de l'horizon du temps (reconduire les mêmes technologies que l'année de référence).



**Figure 22 : Efforts d'économie d'énergie de l'industrie du verre**



**Figure 23 : Efforts d'économie d'énergie de l'industrie du ciment**

Après avoir constaté que des résultats du modèle permettaient de dissocier l'apport des nouvelles technologies et les gains d'efficacité énergétique il est pertinent, en termes d'économies d'énergie et de structure de production, de montrer les capacités du modèle pour l'aide à l'analyse des critères économiques dans les choix technologiques. Nous montrons les résultats de la sidérurgie à titre d'exemple.

#### 7.1.4. Coût marginal des nouvelles technologies un élément déterminant pour l'aide à la décision

Dans un futur incertain, la qualité d'un exercice de prospective énergétique est caractérisée par la fiabilité des données requises et les hypothèses retenues. Face aux aléas du futur, aujourd'hui aucun expert ne peut garantir ou justifier l'exactitude et encore moins l'évolution stricte dans le temps<sup>22</sup> de ses propos.

Dans cet environnement complexe, les outils d'aide à la décision permettent d'éclairer et d'orienter les choix futurs à travers d'autres pistes probables.

<sup>22</sup> L'incertitude à long terme dans le progrès technique des nouvelles technologies et leur coût, l'évolution des prix des énergies et de matières premières et la structure économique mondiale rendent cette tâche particulièrement difficile.

La définition de l'aide à la décision est très large. Dans notre cas elle permet de répondre aux questions liées aux choix d'investissements sur lesquelles les décideurs de l'industrie lourde peuvent se projeter. Autrement dit, estimer la différence de coût entre la technologie choisie par le modèle d'optimisation et celle qui se situe juste après.

En effet, notre modèle trouvera la solution optimale sans autre critère que ceux modélisables. Il ne prendra pas en compte certains critères qui peuvent influencer les décisions d'investissements comme certains effets sociologiques (suppressions d'emplois par les choix technologiques). Il est donc important d'aller au-delà du résultat optimal de notre problème et montrer les différentes technologies qui peuvent être comparables en terme technico-économique.

Pour effectuer cette analyse, nous nous basons sur les résultats de notre programme optimisation et notamment sur les coûts marginaux des technologies qui nous sont donnés par le dual de notre programme linéaire. Ces coûts marginaux peuvent mettre en exergue une technologie qui est très proche économiquement de la solution optimale et qui peut s'avérer plus pertinente pour un décideur, selon d'autres critères non pris en considération dans le calcul optimal.

C'est en ce sens que notre modèle servira d'outil d'aide à la décision. Il est donc important de bien analyser tous les résultats du modèle afin d'en tirer toute sa valeur ajoutée.

Avant d'entamer cette analyse, il est important de statuer sur les consommations énergétiques de chaque technologie. Les graphes ci-dessous (Figure 24, Figure 25) montrent bien une forte variabilité dans les consommations énergétiques entre les différents procédés de fabrication. En effet, on observe plusieurs types de consommations énergétiques par technologie, des technologies à base de combustibles et d'autres à base d'électricité. Les technologies à base de combustibles sont classées en deux catégories : celles au charbon et celles au gaz naturel. Cette diversité offre un panel de choix énergétique très large ce qui procure une forte variabilité dans le mix énergétique global.

Cet aperçu des consommations énergétiques par sources permet aux décideurs de procéder à une première analyse, qui aboutira in fine au choix d'investissement, non seulement par la connaissance du type de combustible, mais aussi par le niveau de consommation spécifique. Ensuite l'analyse permettra de comparer les technologies en concurrence par leurs coûts marginaux de production. Ces variables supplémentaires vont permettre une analyse plus argumentée pour justifier un choix final.

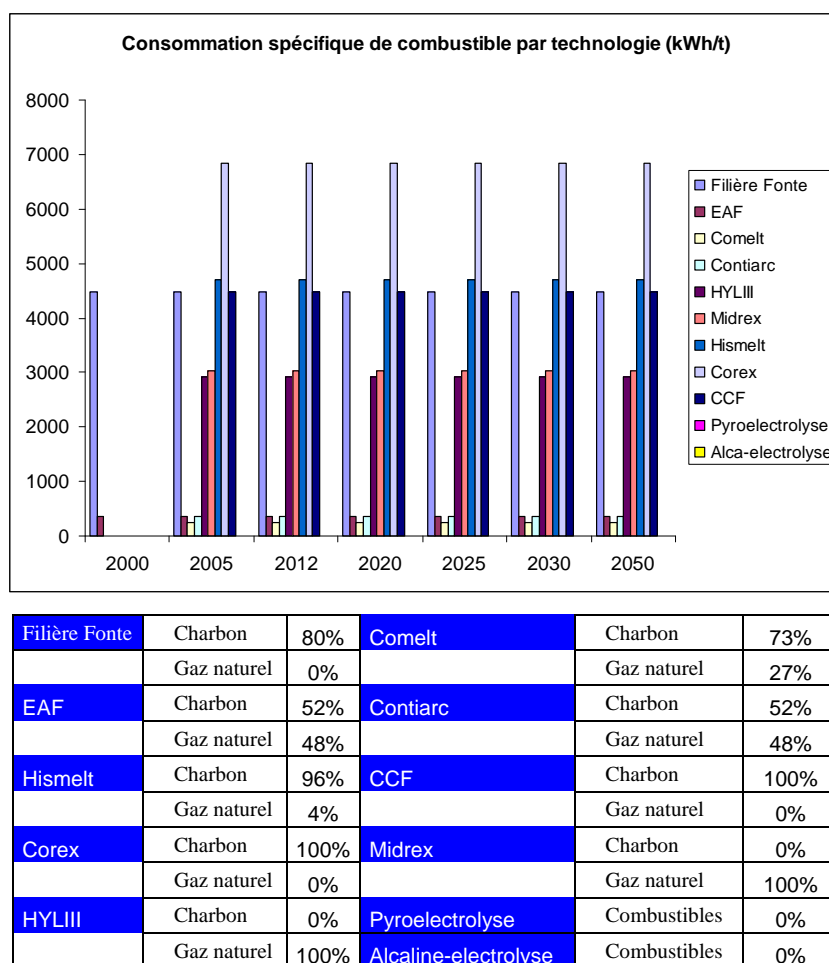


Figure 24 : Consommation unitaire moyenne des combustibles par technologie kWh/t

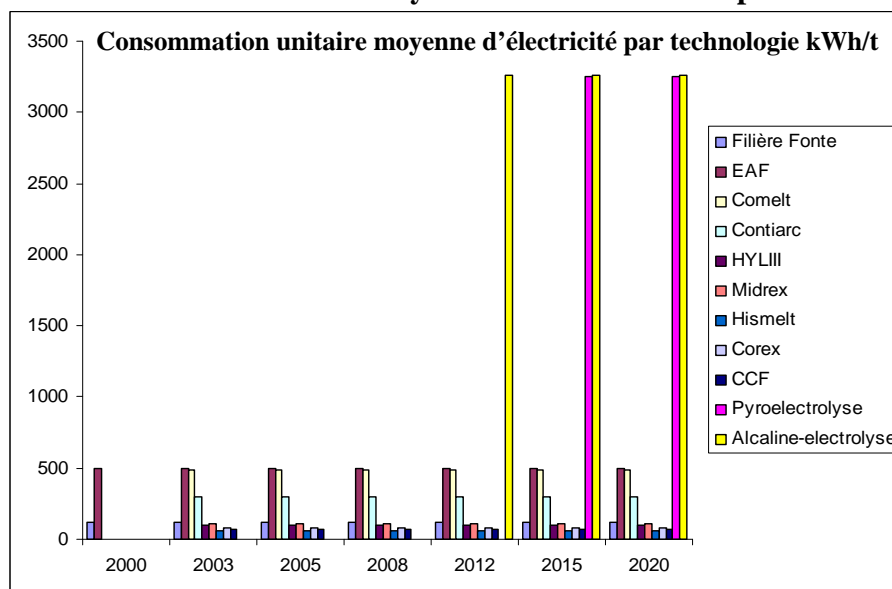


Figure 25 : Consommation unitaire moyenne d'électricité par technologie kWh/t

Dans cette partie, nous présentons les potentialités de notre modèle en tant qu'outil d'aide à la décision. Comme précisé précédemment, nous ne détaillerons pas dans cet ouvrage un cas

d'étude dans le détail mais nous mettrons en évidence toutes les capacités du modèle pour de futures études.

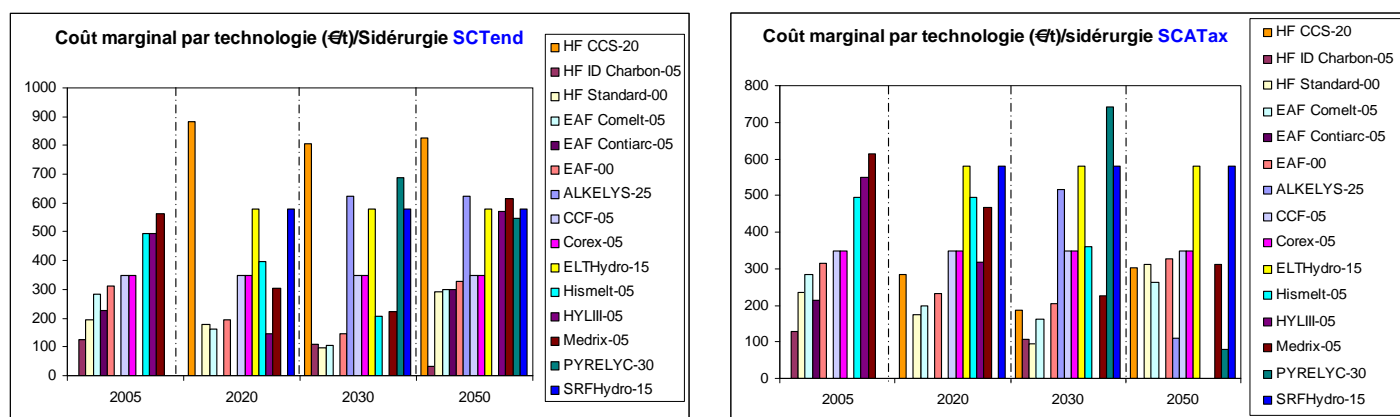
Notre programme linéaire nous donnant accès à une grande quantité de résultats, nous allons prendre pour exemple la valeur ajoutée que représentent les coûts marginaux et ce que l'on peut en déduire pour statuer sur certains choix.

Cette connaissance des coûts marginaux permet de pousser plus loin l'analyse des choix d'investissement en ayant une quantification de la pertinence des autres choix possibles. Cependant nous restons dans le cadre d'un exercice de prospective avec une connaissance parfaite de la demande future et des prix des énergies, ce qui introduit un biais dans le résultat de l'optimisation globale.

Malgré ces imperfections inhérentes à la structure du modèle (optimisation globale sur l'horizon de l'étude), l'analyse approfondie des résultats permet une réelle aide à la décision dans les choix d'investissements.

La taxe sur les émissions de CO<sub>2</sub> représente un coût supplémentaire sur les coûts de production relatifs aux technologies. Plus les émissions de CO<sub>2</sub> sont élevées, plus l'effet sur le coût de production est important. Les graphes ci-dessous (Figure 26) donnent un aperçu général des coûts marginaux des technologies de production d'acier. On constate que l'application d'une taxe sur le CO<sub>2</sub> contribue à la réduction du coût marginal de production des technologies électriques et des technologies avec séquestration et stockage de CO<sub>2</sub> (observer HF CCS-20, PYRELC-30, ALKELYS-25)<sup>23</sup>.

Pour 2050, l'augmentation de la taxe pourra faire émerger la technologie pyroélectrolyse. Le choix de cette technologie va orienter les consommations énergétiques de l'industrie vers l'électricité (en considérant le contenu en CO<sub>2</sub> du kWh électrique fixé).



**Figure 26 : Coûts marginaux des technologies de la sidérurgie**

L'application d'une taxe supplémentaire de 10 €/tCO<sub>2</sub> confirme la sensibilité de la variation du coût marginal des technologies électriques et des technologies avec séquestration et stockage de CO<sub>2</sub> (CCS), soit une variation de moins 60% pour les technologies avec CCS et de moins 70% pour la pyroélectrolyse. A l'inverse, les technologies à base de combustibles

<sup>23</sup> Les numéros représentent l'année de la disponibilité des technologies.

fossiles voient leur coût marginal augmenter, soit une variation de plus 10% pour le procédé Hismelt et plus 5% pour le haut fourneau avec injection directe de charbon.

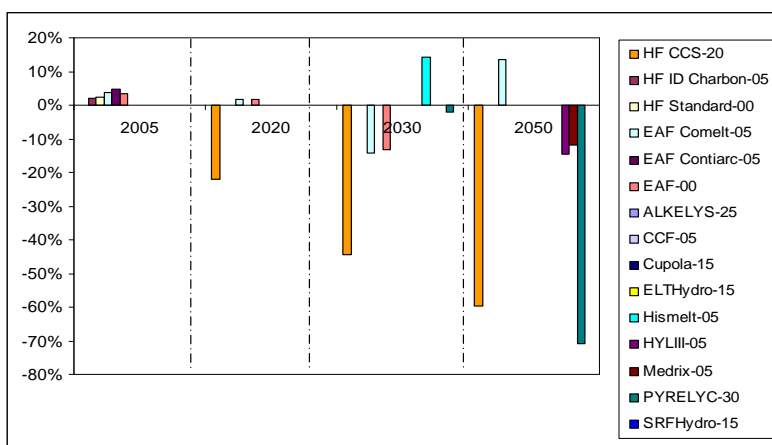


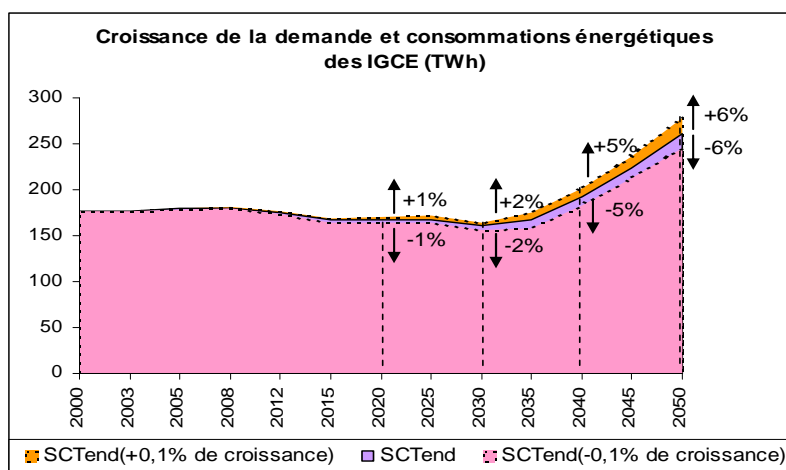
Figure 27 : Effet de la variation de la taxe sur les coûts marginaux de production

#### 7.1.5. La croissance de la demande finale reflète les volumes des consommations énergétiques

En plus des choix énergétiques efficaces pour la production industrielle, à long terme, plusieurs facteurs pourraient modifier la structure de la croissance de la demande finale des industriels : la contrainte environnementale et le prix des énergies. Cette variation de la demande sera principalement affectée par l'impact de ces facteurs sur le comportement des individus vis-à-vis des consommations énergétiques. A titre d'exemple et sans analyse approfondie, l'utilisation de nouveaux matériaux de construction pour une meilleure isolation dans le bâtiment pourrait remplacer les matériaux de construction classiques (ciment, plâtre, briques et tuiles) et ainsi affecter leur demande. La généralisation dans des conditions efficaces du télétravail ou une réorganisation structurée de la distance entre le lieu de travail et le domicile pourrait réduire la demande automobile et, dans la même mesure, la demande d'acier. De ces effets, il découlera une consommation énergétique liée à ces nouveaux besoins de demande utile.

Dans cette partie on estime la sensibilité des consommations énergétiques relative à l'incertitude liée à la croissance de la demande. Le graphe (Figure 28) montre qu'une variation de plus ou moins 0,1% du taux de croissance de la demande a conduit à une variation de plus ou moins 6% des consommations énergétiques en 2050.

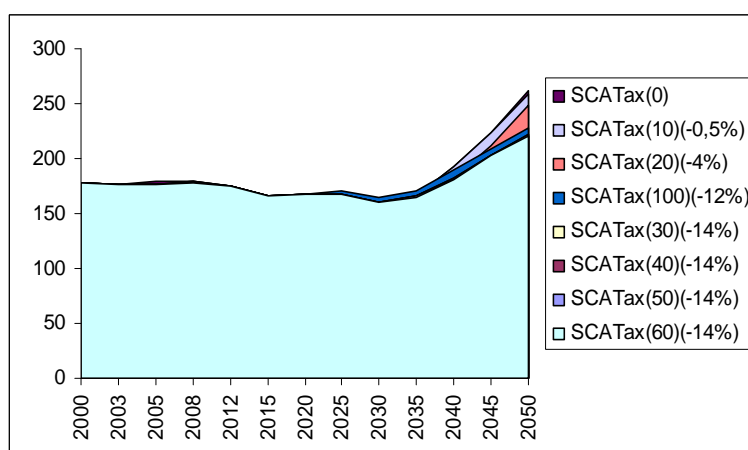
A la lecture du graphe, on constate aussi que les variations des consommations énergétiques par période sont égales pour une même variation de la demande (par exemple pour 2020 +1% et -1% des consommations énergétiques pour une variation de +0,1% et -0,1% de la demande). Ce résultat n'est pas toujours évident car pour une unité supplémentaire, le coût marginal de la technologie déjà choisie peut devenir supérieur à une autre alternative que le modèle va choisir, ainsi la variation des consommations énergétiques ne sera pas affectée dans les mêmes proportions.



**Figure 28 : Sensibilité des consommations énergétiques à la variation de la demande**

### 7.1.6. Effet de variation de la taxe de CO<sub>2</sub> sur les consommations énergétiques des IGCE

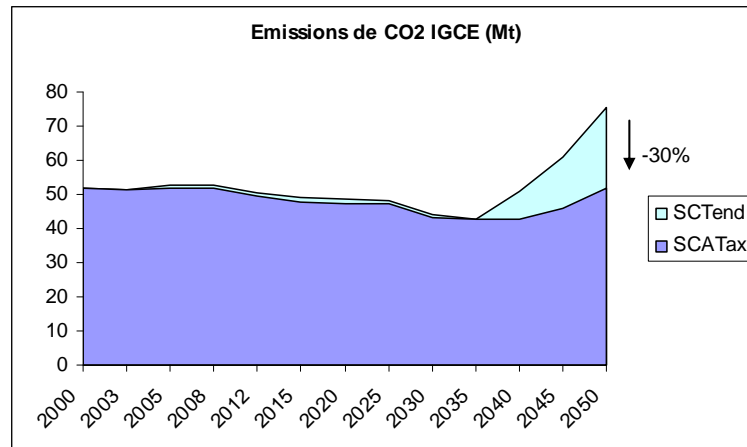
Le graphe (Figure 29), montre les économies d'énergie réalisées par l'effet de la variation du niveau de la taxe. On constate que le modèle commence réellement à réagir à partir d'une taxe de 30 €/t de CO<sub>2</sub>. Une taxe comprise entre 30 et 60 € n'influence pas la structure des consommations énergétiques. Par conséquent nous ne constatons pas de variations technologiques. A 100 €/la tonne de CO<sub>2</sub>, l'économie réalisée est de 12%. Elle est donc inférieure au cas où la taxe est à 30 ou à 60 €. Ce résultat s'explique par l'émergence de la pyroélectrolyse qui engendre une forte hausse des consommations d'électricité. Ce résultat nous montre bien l'influence des ruptures technologiques engendrées par une forte contrainte environnementale qui n'ont pas forcément un effet positif sur la consommation absolue. Ce résultat est à relativiser pour le cas de la France qui a la particularité d'avoir un kWh électrique peu carboné ce qui n'est pas le cas des autres pays où nous constaterions sûrement un comportement différent.



**Figure 29 : Effet de variation de la taxe CO<sub>2</sub> sur les consommations énergétiques (TWh)**

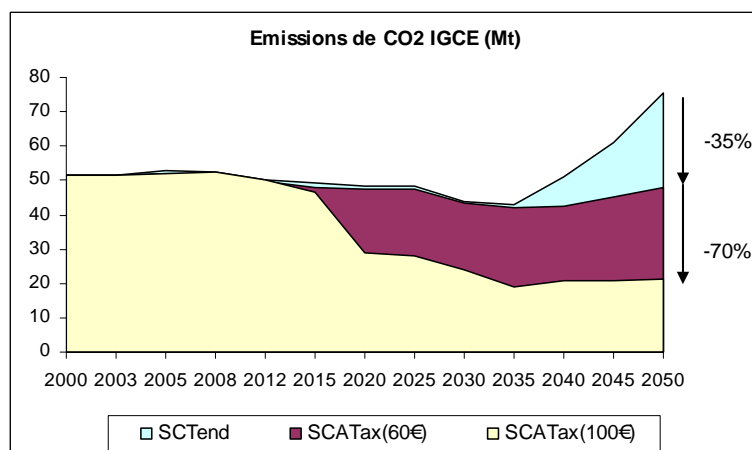
### 7.1.7. Emissions de CO<sub>2</sub> des IGCE scenario avec taxe (SCATax)

L'effort de baisse des émissions de CO<sub>2</sub> réalisé est de 30% (Figure 30) pour une taxe de CO<sub>2</sub> à 50 €/t. Cette baisse est réalisée suite à la baisse des consommations énergétiques.



**Figure 30 : Effort de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>**

Pour un niveau de taxe supérieure (soit 100 €/t de CO<sub>2</sub> émise), l'effort de baisse des émissions de CO<sub>2</sub> est considérable (Figure 31) soit 70% par rapport au scénario tendanciel. Pour une taxe à 60 €/t de CO<sub>2</sub> on constate que la réduction des émissions est de 35%. Elle est donc inférieure à la réduction pour une taxe à 50 €, or nous avons constaté dans le cas du graphe ci dessus (Figure 30) que les consommations énergétiques se situent au même niveau. En effet, cette variation des émissions de CO<sub>2</sub> s'explique non pas par la baisse des consommations énergétiques, mais par le changement dans le mix énergétique. Prenons comme exemple la valorisation dans les usages énergétiques des gaz de cokerie à faible émissions de CO<sub>2</sub> qui sont utilisés à la place des gaz de haut fourneau dont les émissions de CO<sub>2</sub> restent considérables.



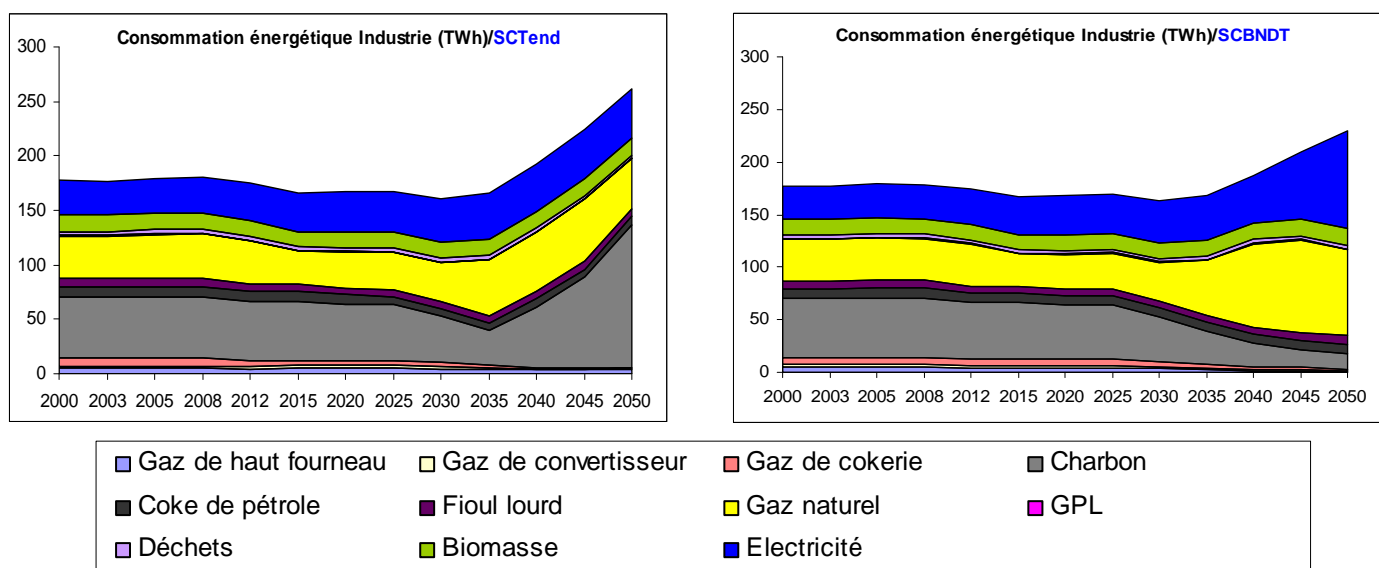
**Figure 31 : Effet de la variation de la taxe CO<sub>2</sub> sur les émissions globales**

Après avoir analysé l'impact d'une taxe CO<sub>2</sub> sur les IGCE, nous allons procéder à l'analyse des résultats d'un scénario facteur 4 pour les IGCE.



## 7.2. Scenario facteur 4 (SCBNDT) : entre électricité et stockage de CO<sub>2</sub>

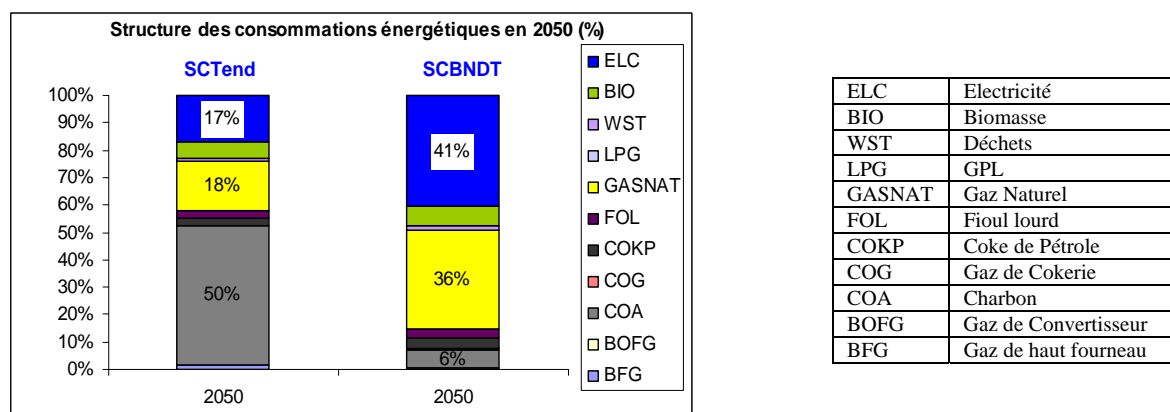
### 7.2.1. Profil d'évolution des consommations énergétiques



**Figure 32 : Consommations énergétiques des IGCE scénario tendanciel et scénario facteur 4**

Dans le cas du scénario facteur 4 (Figure 32), après une forte augmentation du gaz naturel entre 2035 et 2045 on constate la reprise de l'électricité à partir de 2045 pour s'établir à 93 TWh en 2050 soit une augmentation de 200% par rapport au niveau de 2000. Cependant, la part de gaz naturel reste toujours considérable. Le charbon s'est quasiment effacé en 2050. Dans le mix énergétique global, en 2050, la part de l'électricité est de 41%, celle du gaz naturel de 36% et celle du charbon de 6% (

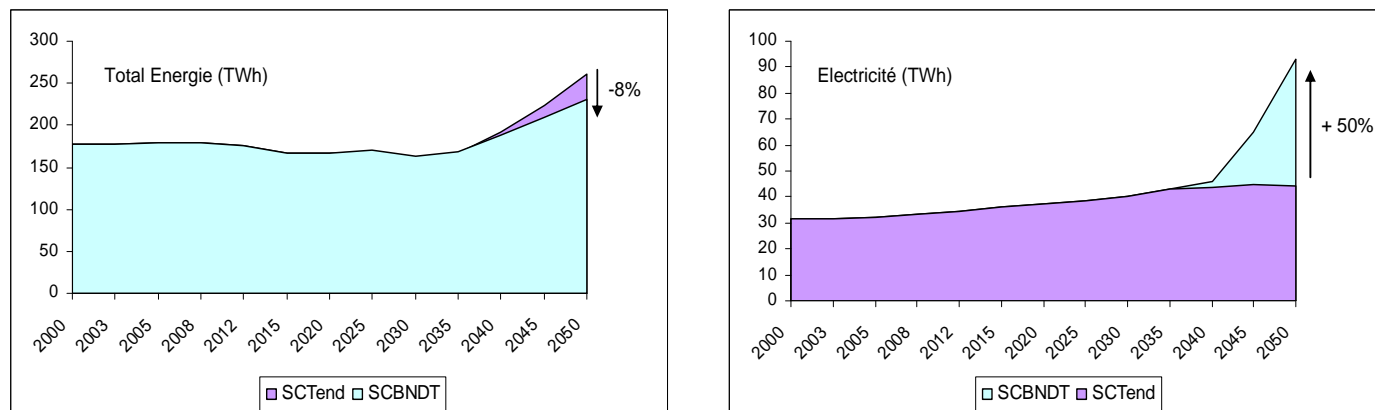
Figure 33). La forte hausse de la consommation d'électricité est due à la production d'acier par le procédé de pyroélectrolyse et la hausse de la part de la filière électrique [au détriment de la filière fonte classique]. Ces résultats mettent en exergue la pénétration de nouvelles technologies plus performantes et nécessitent la mise en place de CCS quel que soit son coût.



**Figure 33 : Répartition des consommations énergétiques des IGCE en 2050, scénario tendanciel et scénario facteur 4**

### ➤ L'effort d'économie d'énergie des IGCE

La structure énergétique établie ci-dessus contribue à un effort d'économie d'énergie de 8% par rapport au scénario tendanciel. Ce faible effort s'explique par la forte hausse des consommations électriques inhérentes aux nouvelles technologies moins émettrices de CO<sub>2</sub>.



**Figure 34 : Effort d'économie d'énergie (toutes énergies confondues) réalisé par les IGCE (TWh) scénario facteur 4**

#### 7.2.2. Les chemins technologiques pour la réalisation du facteur 4

La question qui se pose immédiatement dans le cas d'un scénario facteur 4 est la suivante : quel est le mix des technologies choisies pour satisfaire la contrainte imposée sur le plafond des émissions de CO<sub>2</sub> ?

Le graphe ci-dessous (Figure 34) met en évidence la contribution technologique par secteur pour satisfaire le niveau d'émissions imposé. Elle s'avère très variable entre les différents secteurs :

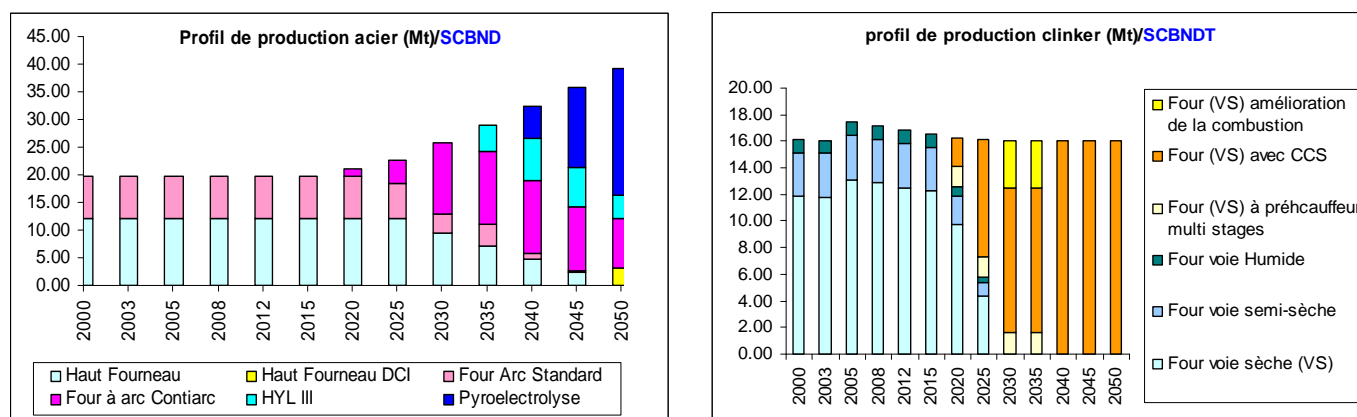
- la sidérurgie s'est orientée vers une combinaison technologique gaz naturel et électricité,
- le ciment penche vers la séquestration et le stockage de CO<sub>2</sub> (CCS),
- le verre est diversifié (électricité, gaz naturel et CCS).

L'apparition de ces technologies propres en CO<sub>2</sub> et à coût d'investissement élevé, s'explique par la forte contrainte sur les émissions de CO<sub>2</sub> imposée durant cette période de temps du modèle (2050).

Les hypothèses prises pour la séquestration et le stockage de CO<sub>2</sub> reflètent les conditions favorables à la mise en place de cette technique en terme de [Cribellier, 2005 ; DGEMP, 2005 ; Hendriks, 2004; WEC, 2007] :

- accès au réseau de transport dans un cadre dimensionnel centralisé,
- volumes stockés,
- risques de relâchement,
- coût raisonnables<sup>24</sup>.

<sup>24</sup> [www.planete-energies.com/HtmlContents/en-us/Article/7\\_17\\_the\\_co2/dossier.pdf](http://www.planete-energies.com/HtmlContents/en-us/Article/7_17_the_co2/dossier.pdf)



**Figure 35 : Structure technologique des IGCE permettant le facteur 4**

### 7.2.3. La réalisation du facteur 4 sans la séquestration et le stockage de CO<sub>2</sub>

Dans cette partie nous montrons ce que l'absence de disponibilité des technologies de séquestration et de stockage de CO<sub>2</sub> dans le modèle a permis de mettre en exergue.

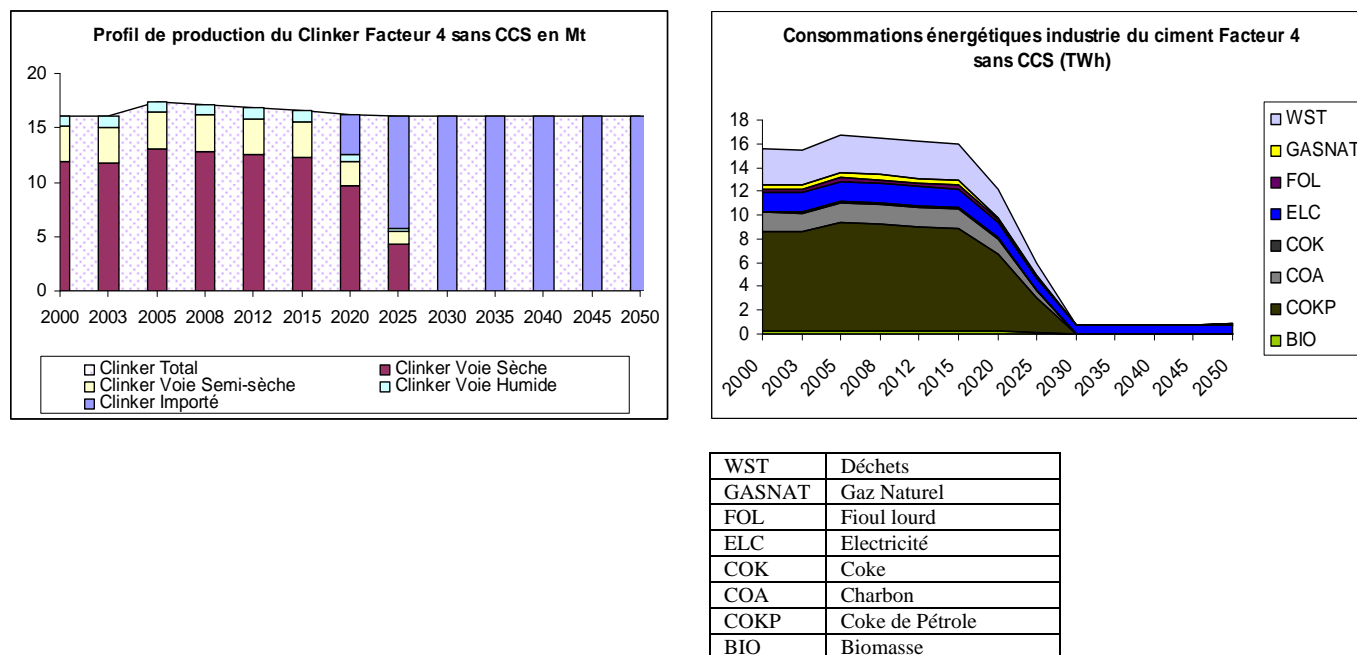
Les résultats qui suivent permettent d'avoir un aperçu différencié selon les secteurs de leur comportement sous cette contrainte environnementale sévère.

#### ➤ L'industrie du ciment : une orientation vers l'importation de clinker

Dans l'industrie du ciment, l'importation de clinker (Figure 36) s'avère l'ultime solution pour réaliser un facteur 4 sans la possibilité de faire appel aux technologies avec séquestration et stockage de CO<sub>2</sub> (CCS).

L'importation de clinker n'est pas la solution la plus efficace pour faire face au changement climatique. En effet, l'importation de clinker par les pays de l'UE va faire accroître sa production dans les autres régions (pays émergents) non couvertes initialement par le protocole de Kyoto et leur avenir sur les questions environnementales reste incertain. Par conséquent, les émissions de CO<sub>2</sub> globales restent inchangées et pourront même globalement s'accroître<sup>25</sup> en entraînant la persistance de menace de réchauffement climatique. Cette solution représente en outre une forme de délocalisation des usines et des consommations énergétiques associées.

<sup>25</sup> Les pays émergents n'utilisent pas forcément des procédés énergétiquement efficaces.

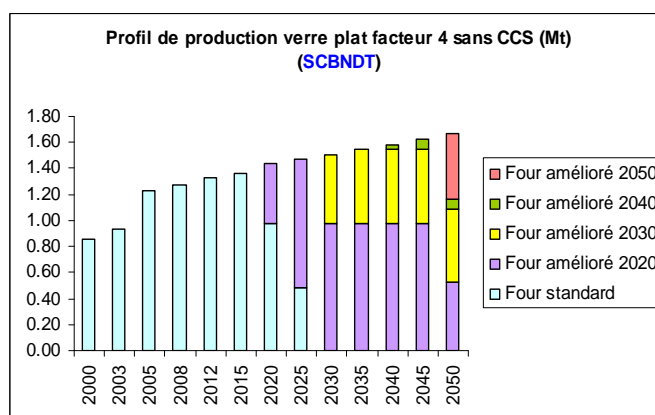


**Figure 36 : Profil de production et consommations énergétiques industrie du ciment scénario facteur 4 sans CCS**

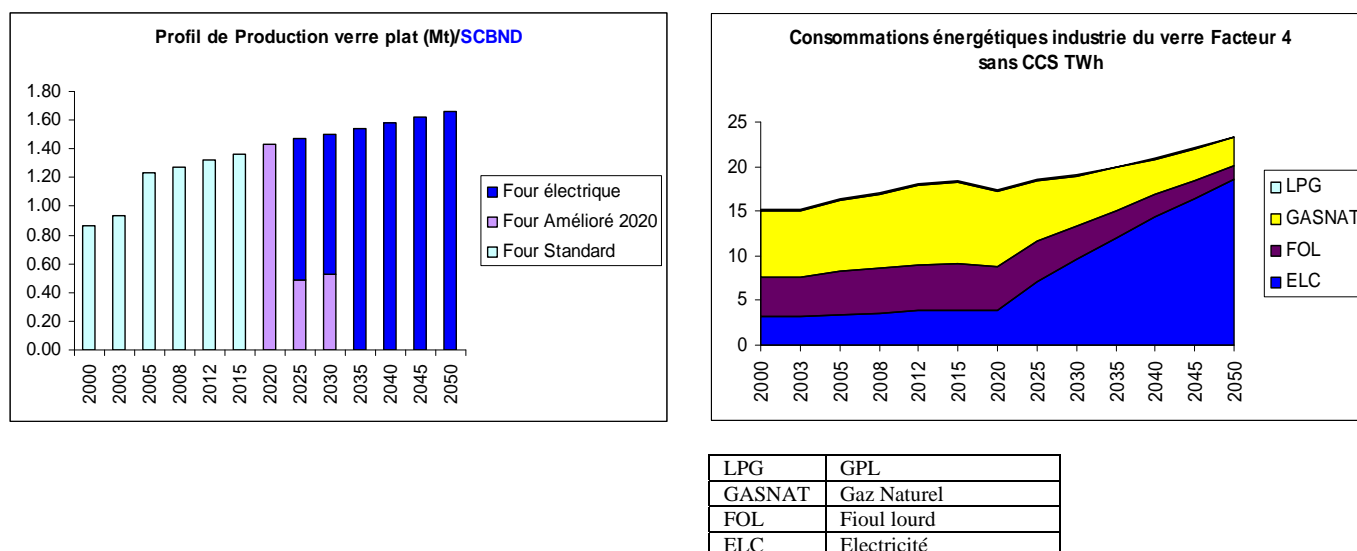
➤ **L'industrie du verre : les fours électriques engendrent la hausse des coûts marginaux de production**

Dans le cas du facteur 4 national industries globales (SCBNDDT), certains secteurs n'ont pas été contraints. Par exemple, dans le cas de l'industrie du verre (Figure 37), la structure technologique finale d'un scénario facteur 4 est identique au scénario tendanciel. En effet, cela s'explique par le fait que la satisfaction de la contrainte globale est tirée par l'industrie du ciment dans laquelle les coûts d'abattement de la tonne de CO<sub>2</sub> sont les moins chers par rapport à d'autres secteurs (le recours aux importations de Clinker).

L'application d'un facteur 4 spécifique à l'industrie du verre (SCBND) a montré que la tendance dans les choix technologiques s'orienterait plutôt vers les fours électriques (Figure 38). L'électricité comme solution est particulière à la France car le parc de production d'électricité est majoritairement nucléaire.

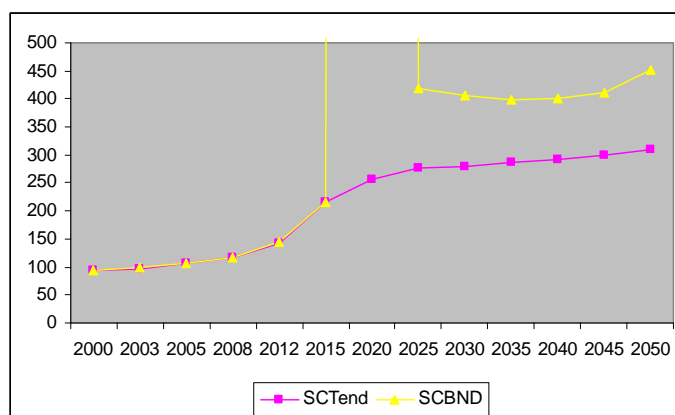


**Figure 37 : Profil de production du verre scénario facteur 4 sans CCS**



**Figure 38 : Profil de production et consommations énergétiques industrie du verre scénario facteur 4 sans CCS**

Le recours aux fours électriques implique des coûts de production plus élevés donc une forte compétitivité sur le marché international. **Le coût marginal très élevé en 2020 montre qu'il est impossible de satisfaire la contrainte à cette période car le modèle ne peut faire appel à une technologie satisfaisant la contrainte environnementale.** L'émergence des fours électriques à partir de 2025 rendrait possible la réalisation de la contrainte sur les émissions.



**Figure 39 : Coût marginal de production dans l'industrie du verre, scénario facteur 4 sectoriel (SCBND)**

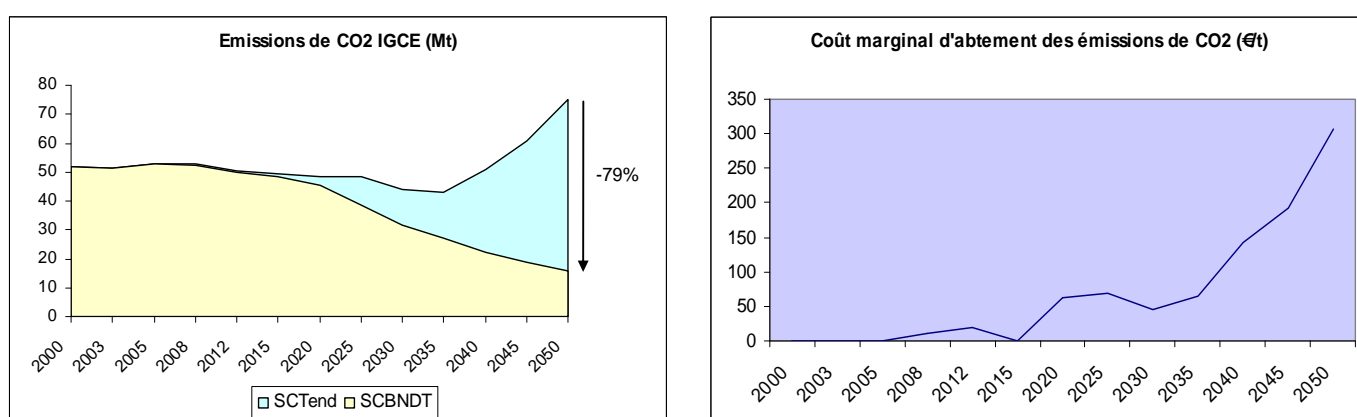
Ce cas nous montre l'impossibilité de parvenir à un facteur 4 pour l'industrie du verre prise indépendamment des autres industries. Les technologies prévues jusqu'à 2025 ne permettent pas de respecter la contrainte. La seule possibilité du modèle pour converger a été d'augmenter artificiellement son coût marginal.

Ce type de résultat nous montre les limites du modèle, et nous ne pouvons interpréter les résultats obtenus. La seule solution pour pouvoir analyser les résultats serait de permettre au modèle d'importer le verre pendant cette période afin d'être en mesure de valider le calcul d'optimisation global sur l'horizon de l'étude.

### 7.2.4. Emissions de CO<sub>2</sub> des IGCE

#### ➤ Profil des émissions de CO<sub>2</sub> des IGCE

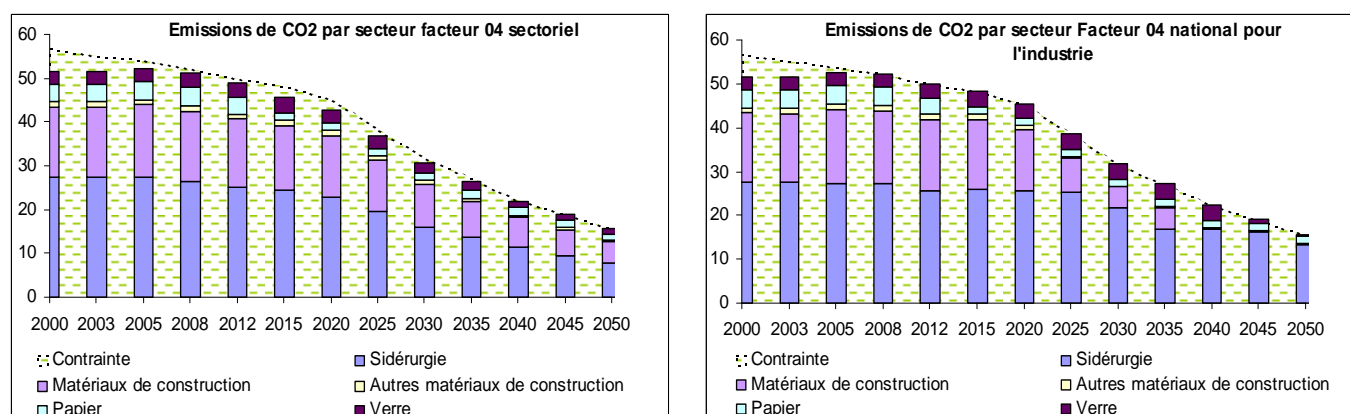
Les émissions de CO<sub>2</sub> réalisées dans le scénario facteur 4 représentent une baisse de 79% par rapport au scénario tendanciel. Par conséquent, le coût de la contrainte s'établit en 2050 à 300 €/t de CO<sub>2</sub>. Cette valeur reflète la limite du modèle à simuler une contrainte d'émissions et non le prix réel à payer pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. En d'autres termes, elle représente le prix qu'il faudrait affecter à la tonne de CO<sub>2</sub> pour que le système énergétique retenu soit optimal. Malgré l'avènement des technologies CCS, il faudrait encore pouvoir compter sur une taxe élevée sur les émissions de CO<sub>2</sub> afin d'être en mesure de tenir ces contraintes. Le modèle montre donc aux décideurs qu'il faut aller au-delà des choix technologiques et travailler sur les comportements permettant d'influencer à la baisse la demande utile.



**Figure 40 : Emissions et coût marginal d'abatement de CO<sub>2</sub> des IGCE, cas d'un facteur 4**

#### ➤ Contribution sectorielle aux efforts de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>

La comparaison entre un facteur 4 national pour l'industrie et un facteur 4 sectoriel, a montré un comportement différent selon les secteurs d'activité concernant la contrainte imposée.



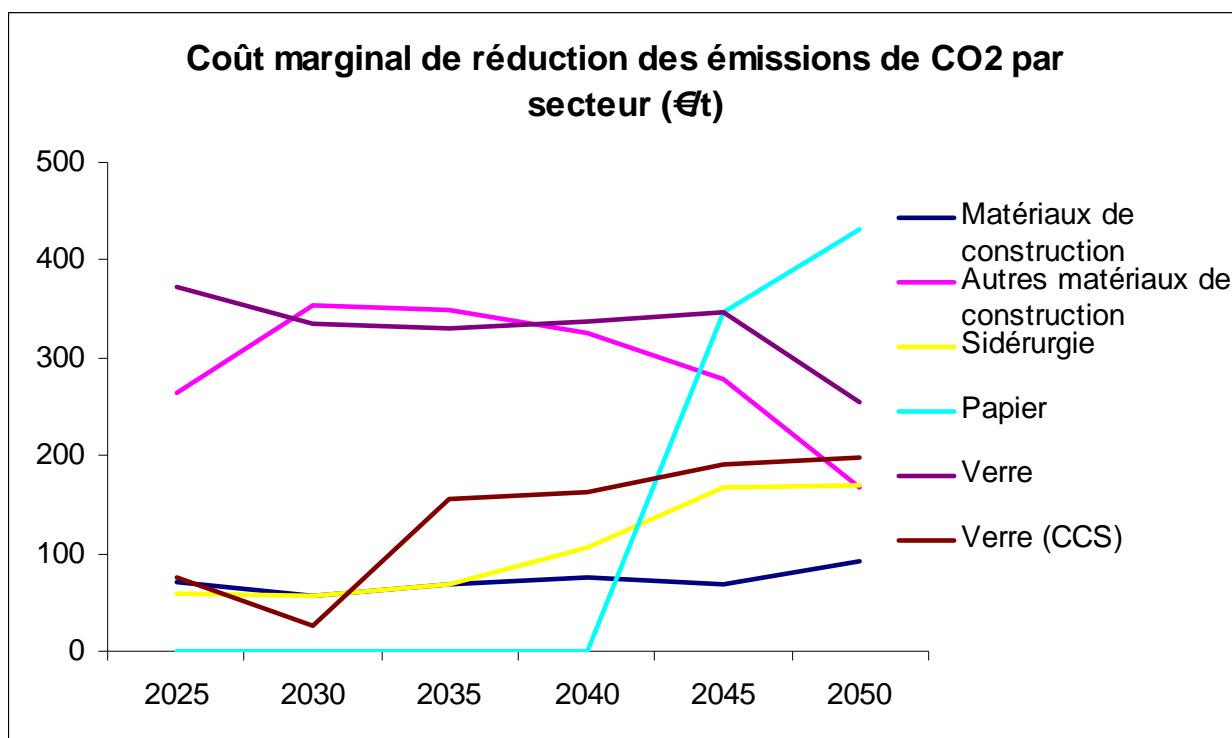
**Figure 41 : Structure sectorielle des émissions de CO<sub>2</sub> par effet d'un facteur 4 global ou sectoriel**

La lecture des graphes ci-dessus (Figure 41) montre que l'application d'une contrainte nationale (globale) sur les émissions de CO<sub>2</sub> impose une réduction plus drastique des émissions de l'industrie du ciment que dans les autres secteurs. C'est un résultat en accord avec la minimisation du coût global actualisé qu'effectue notre modèle. Le modèle privilégie donc la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans les secteurs au coût le plus faible. Par déduction, l'industrie du ciment est celle qui représente le coût de réduction le plus faible sur l'ensemble des secteurs d'activité.

### ➤ Coût marginal de réduction de CO<sub>2</sub> par secteur

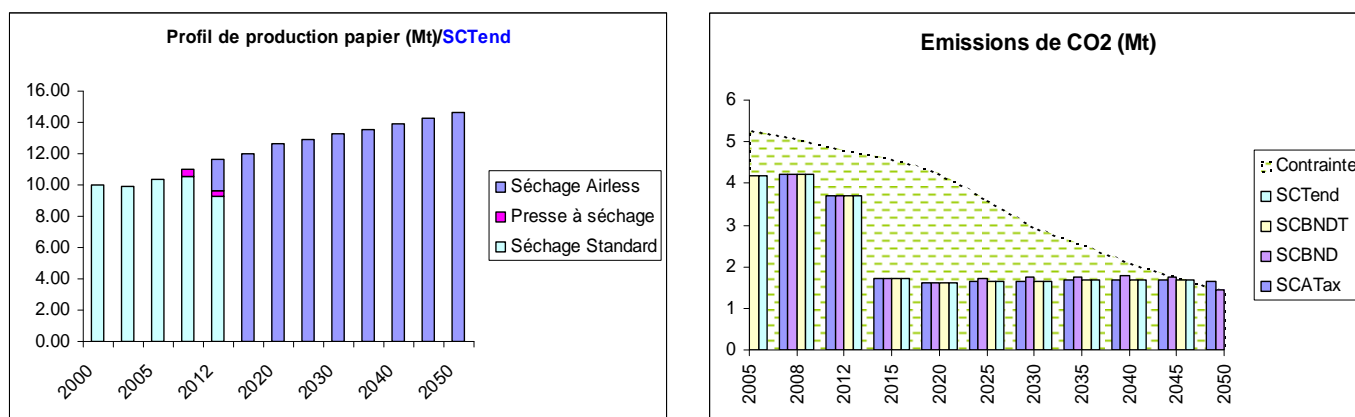
Le coût d'abattement de la tonne de CO<sub>2</sub> sectoriel confirme bien le comportement des secteurs industriels vis-à-vis du respect des émissions imposées. Le graphe (Figure 42) montre que le coût associé à la contrainte est plus faible dans l'industrie du ciment.

Cette comparaison de coût pourrait être simulée dans le cadre d'un marché de quotas d'émissions de CO<sub>2</sub> afin de refléter la préférence à l'achat ou à la vente des quotas. En effet, les sidérurgistes et les papetiers étant les secteurs dont le coût est le plus élevé auront une préférence plus forte à acheter sur le marché, à l'inverse les verriers et cimentiers préféreront vendre.



**Figure 42 : Coût marginal d'abattement de la tonne de CO<sub>2</sub>**

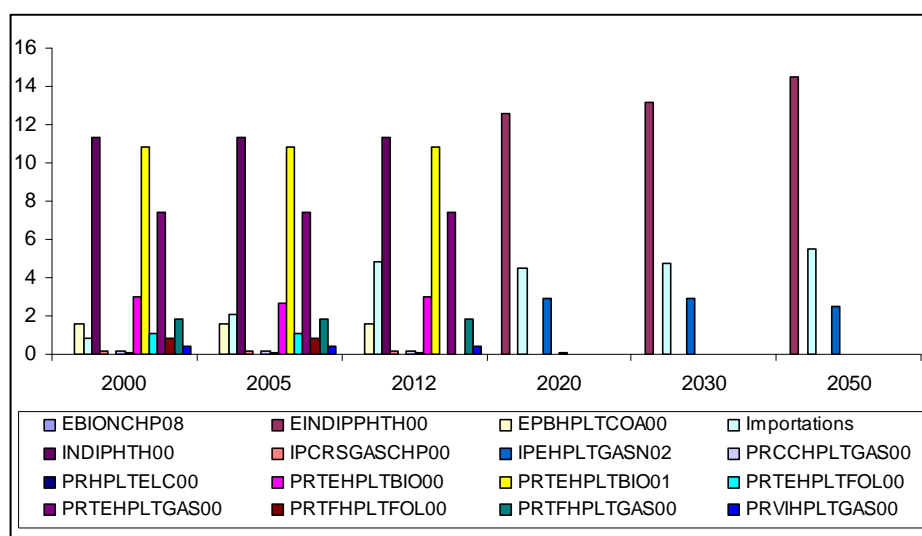
Le coût nul pour l'industrie du papier entre 2025 et 2040, s'explique par les faibles émissions réalisées durant cette période, soit un niveau inférieur au plafond imposé. Ce niveau d'émission faible s'explique par la pénétration de la technologie de séchage sans air (Airless). Cette technologie révolutionnaire permet de réduire les consommations de vapeur de l'ordre de 70 à 90% avec une légère augmentation de la consommation d'électricité de 15 à 20% [de Beer, 2000]. Cette baisse dans les consommations énergétiques devrait permettre une réduction massive des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'industrie du papier.



**Figure 43 : Profil de production et émissions de CO<sub>2</sub> de l'industrie du papier (Mt)**

### ➤ La prise en compte des chaudières et le remplacement de la capacité résiduelle

Le profil de production du papier montre que la technologie de séchage Airless perce avant la fin de la durée de vie des installations existantes (considérées comme déjà rentabilisées). Cette action qui caractérise cette industrie, s'explique par la consommation importante de chaleur, combinée à l'arrivée en fin de vie des chaudières existantes. Par conséquent, un investissement anticipé pour le remplacement du parc de production de chaleur a été choisi par le modèle. Le niveau de ce nouvel investissement a permis le basculement vers le procédé de séchage Airless.



**Figure 44 : Les technologies de production de chaleur dans l'industrie papetière (TWh)**

## 7.3. Le coût de la contrainte environnementale est différencié par pays en Europe

En Europe, les émissions de CO<sub>2</sub> dans les secteurs d'activité ainsi que les quotas imposés sont très variables d'un pays à un autre. On constate par exemple que l'Italie est très contrainte par les quotas car les émissions réalisées dépassent le seuil. Les graphes ci-dessous (Figure 45), montrent cette diversité entre les différents pays. Le coût de la contrainte pour l'Italie s'établit en 2050 à 490 €, celle de la Pologne étant la plus faible à 71 €



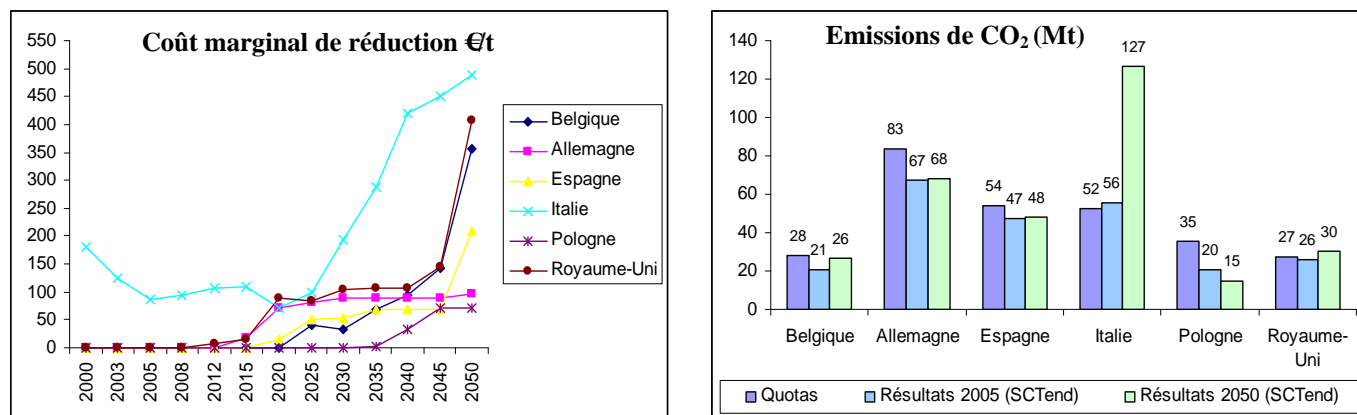


Figure 45 : Le coût de la contrainte environnementale par pays en Europe

#### 7.4. Taux d'actualisation du capital une moyenne pondérée des retours sur investissement

Le taux d'actualisation à 8% n'a pas fait varier la structure technologique de l'industrie. Par contre un taux d'actualisation à 10% comme on peut le constater dans les graphes ci-dessous (Figure 46), a fait varier la structure des technologies de production dans l'industrie du ciment (broyeur et fours à clinker). En effet, l'écart constaté entre les coûts d'investissement et les consommations énergétiques a suffi au basculement de la technologie de broyage à haut rouleau de presse vers la technologie de broyage avec classificateur à haute efficacité. L'investissement étant inférieur de 2 €/t pour une augmentation de 5 kWh/t.

Dans les fours à clinker, on constate l'augmentation de la capacité du four avec système de combustion améliorée au détriment d'un four multi-étage.

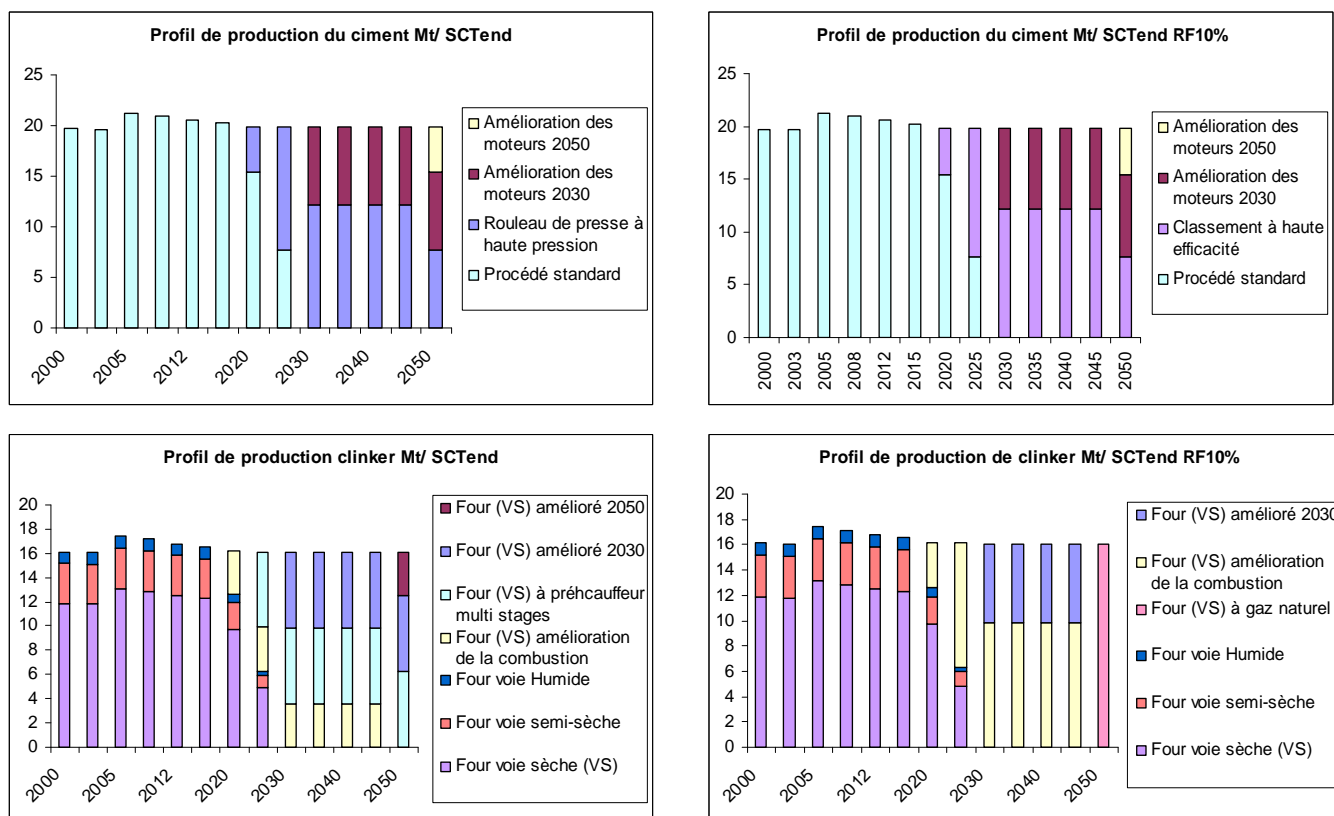
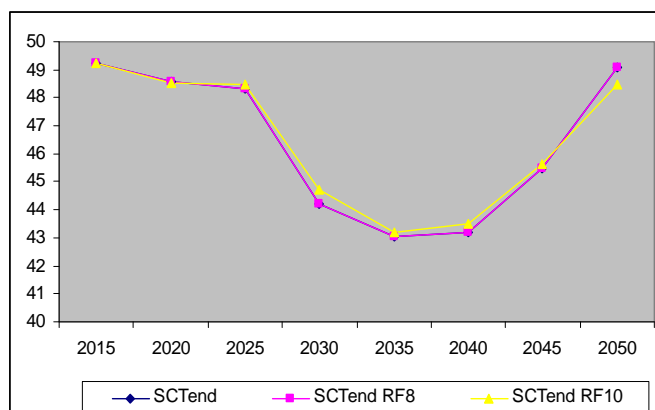


Figure 46 : Structure technologique de l'industrie à un taux d'actualisation à 10%

En effet, cette variation dans les procédés a légèrement fait varier les consommations énergétiques globales, et les émissions de CO<sub>2</sub> se voient légèrement modifiées.



**Figure 47 : Les émissions de CO<sub>2</sub> avec la variation du taux d'actualisation**

## 8. Conclusion

Nous venons de passer en revue quelques exemples de potentialités de notre modèle. Afin de parvenir à exploiter ces résultats il nous a fallu :

- Valider nos modèles à partir du lot de données que nous avons uniformisé et ramené à une seule année de référence.
- Etablir trois scénarios à partir du recueil d'hypothèses établies par d'autres exercices de prospective et les adapter à nos cas d'étude afin de trouver le bon compromis permettant une bonne sollicitation des modèles.

Les résultats présentés nous montrent bien la pertinence de nos choix de modélisations dans la comparaison des technologies sur le long terme selon les contraintes que l'on s'est fixé. Le modèle nous permet de mettre en évidence les basculements de certaines technologies et nous donne par le biais des coûts marginaux des éléments de choix autour de l'optimum. Il nous permet aussi d'obtenir un aperçu du niveau de taxe qu'il faudrait mettre en œuvre pour satisfaire une contrainte environnementale forte.

D'après les résultats du modèle, le profil énergétique obtenu ne reflète pas exactement la réalité de la situation énergétique possible en Europe. En effet, une augmentation de la consommation de gaz naturel impliquerait une dépendance énergétique plus accrue vis-à-vis des combustibles fossiles, ce qui irait à l'inverse de la politique énergétique européenne. Cependant il vient directement à l'idée que cette situation (exigences de l'EU vis-à-vis de leur engagement en politique énergétique) n'est pas adaptée à l'industrie en Europe à moins d'une réorganisation de la structure du marché du gaz naturel dans les années à venir.

Les résultats du modèle sont soumis à l'évolution de la conjoncture économique et énergétique à long terme. L'électricité reste probablement une solution pour l'industrie en France, mais elle est moins évidente pour le reste des pays européens, sauf en cas d'une généralisation du nucléaire (fortement contesté par le débat publique). La séquestration et le stockage de CO<sub>2</sub> reste parmi les solutions les plus envisageables pour faire face à la conséquence du réchauffement climatique, mais celle-ci laisse en suspens quelques questions

sur les volumes et les quantités stockées, le risque de relâchement, le réseau de transport centralisé et la garantie des coûts abordables. Dans une dimension de « Peak Oil », le développement d'autres sources d'énergies actuellement immatures, suffira-t-il aux besoins des consommations énergétiques future ?

L'impossibilité de répondre à ces questions montre qu'il est nécessaire de s'engager dans une réflexion de prospective énergétique à long terme, et les résultats de notre modèle montrent que c'est un exercice très délicat et complexe, car par construction il s'inspire des évolutions futures totalement incertaines.

## **9. Bibliographie**

### **[ADEME, 2005]**

Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Energie, Note de cadrage sur le contenu CO<sub>2</sub> du kWh par usage en France, 2005.

### **[Bertoldi, 2000]**

Bertoldi, P., The Use of Long Term Agreements to Improve Energy Efficiency in the Industrial Sector: Overview of the European Experiences and Proposal For a Common Framework, European Commission, 2000.

### **[Capros, 1996]**

Capros P., PRIMES and GEM-E3 Contribution to Climate Change Policy Debate, Papier présenté au Workshop international de l'AIE sur le climat "Climate: Integrating Science, Economics, and Policy", Paris, 19-20 mars 1996.

### **[CEREN, 2003a]**

Modèle de consommations d'énergie dans l'industrie en Europe, Etude Réalisée pour EDF, CEREN 2003.

### **[CEREN, 2003b]**

Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie, Le profil énergétique du secteur du papier et carton, Secteur 35, Enquête par enquête, EMIE 2001, 2003..

**[CEREN, 2005]**

Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie, Le profil énergétique du secteur de la métallurgie, Secteurs E15 – E16 – E17 – E18 – APE 275 et 284, Enquête par enquête, EMIE 2003, 2005..

**[CEREN, 2006]**

Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie, Le profil énergétique du secteur des matériaux de construction et du verre, Secteur E19 – E20 – E21 – E22, Enquête par enquête, EMIE 2004, 2006.

**[Chambolle, 2004]**

Chambolle T., Méaux F., Nouvelles technologies de l'énergie Rapport, 2004

**[Cosmi, 2008]**

Cosmi C., et al., A model for representing the Italian energy system: The NEEDS-TIMES experience, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2008

**[Cribellier, 2005]**

Cribellier M., et al., La séquestration de CO<sub>2</sub>, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.

**[Criqui, 2006]**

Criqui P., Mima S., Rynikiewicz C., Prospective énergétique à 2050, contrainte carbone et changements structurels, Présentation à l'atelier « Vers une représentation des économies sous contrainte carbone », 2006.

**[Criqui, 2006a]**

Criqui P., et al., Prospective énergétique à 2050, contrainte carbone et changements structurels, Présentation à l'atelier « Vers une représentation des économies sous contrainte carbone », Fondri, Paris, 4 avril 2006.

**[Criqui, 2007]**

Criqui P., Mima S., Scenario modeling : The Impact of the Carbon Constrained Scenarios on Steel Industry, ULCOS Trollfjord Seminar, 2007.

**[de Beer, 2000]**

de Beer J., Potential for Industrial Energy Efficiency Improvement in the Long Term, Eco-Efficiency in Industry and Science, Kluwer Academic publishers, London, 2000.

**[de Boissieu, 2006]**

de Boissieu C., Rapport du Groupe de travail « Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050 », Plan, 2006.

**[Delattre, 2005]**

Delattre F., Veron A., Taux d'actualisation public et calcul économique, Diagnostics Prévisionset Analyses Économiques N° 84 , 2005.

**[DGEMP, 2004]**

Direction générale de l'énergie et des matières premières, Observatoire de l'énergie, Scénario énergétique tendanciel à 2030 pour la France, 2004.

**[DGEMP, 2005]**

Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières, Etude pour une prospective énergétique concernant la France, 2005.

**[Escarnot, 2007]**

Escarnot B., Escudero M., Bethenod C., Hita A., Pham-Van-Cang C., Morisset V., Prévisions de consommation d'électricité et de gaz naturel des industries grandes consommatrices d'énergie en France, Rapport technique interne à EDF, Eco-efficacité et Procédés industriels, Expertise Clients et Secteurs Industriels, 2007.

**[Giraud, 2000]**

Giraud P-N., Un scénario énergétique tendanciel pour la France à l'horizon 2020, CERNA, Centre d'économie industrielle, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2000.

**[Gusbin, 2004]**

Gusbin D., Hoornaert B., Perspectives énergétiques pour la Belgique à l'horizon 2030, le Bureau Fédéral du Plan, 2004.

**[Hendriks, 2004]**

Hendriks C., Gauss W., Global Carbon Dioxide Storage Potential and Costs, Ecofys in Cooperation with TNO, 2004.

**[Hourcade, 2003]**

Hourcade J-C., Lecocq F., Le taux d'actualisation contre le principe de précaution ? Leçon à partir du cas des politiques climatiques, L'actualité économique, Vol 80, p. 41-65, 2004.

**[Lebègue, 2005]**

Lebègue D., Hirtzman P., Baumstark L., Le prix du temps et la décision publique, révision du taux d'actualisation public, Commissariat Général au Plan, 2005.

**[MEDAD, 2007]**

Ministère de l'Ecologie du Développement et de l'Aménagement Durables, CO<sub>2</sub> et énergie France et Monde, 2007.

**[Mocilnikar, 2007]**

Mocilnikar A-T., Le post-Kyoto nécessitera-t-il un nouveau Bretton Woods du Carbone ?, 2007.

**[Montan und Wirtschaftsverlag, 2005]**

Handbook of the European Iron and Steel Works, 2005.

**[Montmarquette, 2007]**

Montmarquette C., Scott I., Le taux d'actualisation pour l'évaluation des investissements publics au Québec, centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations, 2007.

**[Radanne, 2004]**

Radanne P., La division par 4 des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050, Ministère de l'Ecologie du Développement Durable, 2004.

**[Rynikiewicz, 2005]**

Rynikiewicz C., Criqui P., Scenarios of energy and environment futures impacting the selection and diffusion of ULCOS technologies, Paper presented at the 2nd ULCOS Seminar 2005 – Aveiro 21-22nd september, Portugal.

**[Soria, 2000]**

Soria A., Climate Technology Strategy within Competitive Energy Markets Energy Technology Strategy 1995-2030: Opportunities Arising from the Threat of Climate Change, IPTS, 2000.

**[Syrota et al., 2007]**

Syrota J., et al., Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050, Rapport de synthèse, Centre d'analyse stratégiques, 2007.

**[Tuddenham, 2006]**

Tuddenham M., Historique Facteur 4 , Groupe Facteur , CITEPA, 2006.

**[Van Regemorter, 2006]**

Van Regemorter D., Kanudia A., Projections of the demand of energy services, New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS), document technique interne pour les pays européens intégrant le projet NEEDS, 2006.

**[WEC, 2007]**

World Energy Council, Carbon Capture and Storage: a WEC “Interim Balance”, 2007.

**[Weizsäcker, 1997]**

Weizsäcker E U., Lovins A B., Lovins L H., Factor 4 : Doubling wealth – halving resource use : a report to the Club of Rome, Earthscan Publications, Londres, 1997.



---

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

---



<b>1. CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>187</b>
RAPPEL DE LA PROBLEMATIQUE .....	187
LES SPECIFICITES DE NOTRE DEMARCHE .....	187
STRUCTURE DU MODELE TIMES-INDUSTRIE .....	188
LES APPORTS ESSENTIELS DE NOTRE APPROCHE .....	188
PRINCIPAUX RESULTATS D'ENSEMBLE.....	189
LIMITES DU MODELE CONSTRUIT .....	190
<b>2. PERSPECTIVES .....</b>	<b>190</b>

# 1. Conclusion Générale

## *Rappel de la problématique*

Dans le cadre de cette thèse nous souhaitons étudier les effets à long terme des mesures politiques en matière d'énergie et d'environnement sur l'évolution des industries grandes consommatrices d'énergie. Nous nous sommes intéressés aux secteurs de la sidérurgie, du papier, du verre, du ciment, de la chaux, du plâtre, de la céramique, des briques et des tuiles. En effet la considération de ces secteurs réside essentiellement dans leur caractère intensif en énergie et en émissions de CO<sub>2</sub>.

Pour répondre à notre problématique, nous avons développé un modèle de prospective énergétique basé sur le générateur de modèle de type bottom-up « TIMES ». Le choix du modèle TIMES comme étant le plus approprié à la représentation de l'industrie est effectué après une analyse pertinente des possibilités et des limites des modèles de perspectives énergétiques existants.

L'objectif central de notre travail est d'abord la construction du modèle, donc de s'assurer de sa consistance ainsi que la validation des choix engagés. Quoique la cohérence est assurée globalement, cette lourde tâche ne nous a pas permis d'approfondir l'analyse des hypothèses exogènes relatives à la croissance de la demande et les hypothèses sur les prix des énergies considérés.

## *Les spécificités de notre démarche*

La construction du modèle s'est basée sur trois aspects majeurs qui ont nécessité un temps considérable dans la démarche :

**La connaissance sectorielle :** la construction du modèle exige une connaissance approfondie des secteurs étudiés. Nous nous sommes essentiellement attachés à définir en détail les caractéristiques de l'ensemble des procédés de fabrication et à tracer les flux d'énergie et de matières premières à travers les ateliers de production. La difficulté d'une telle opération réside essentiellement sur les caractères différents et les spécificités de chaque industrie.

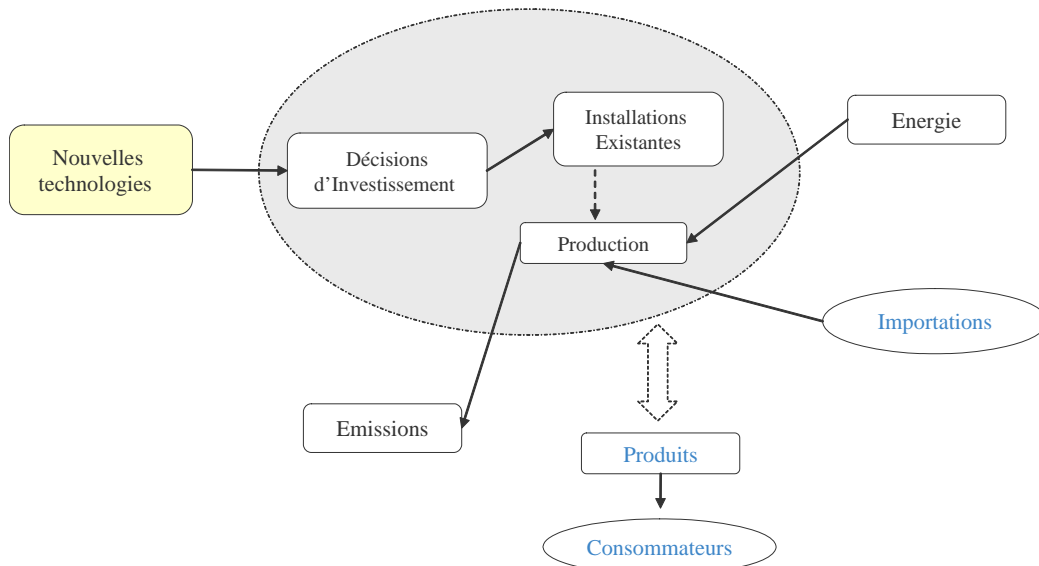
**La prise en main du modèle TIMES :** est une phase incontournable, elle nécessite d'acquérir les premières bases de la modélisation pour interpréter le caractère physique de l'industrie en un caractère chiffrable (numérique). La difficulté est spécifiquement due au caractère particulier de la modélisation TIMES qui nécessite une forte expertise dans la mise en place du modèle afin d'en assurer la cohérence. En effet, plus le modèle est volumineux plus la tâche est difficile. A l'inverse, la forte flexibilité de ce modèle permet d'intégrer certaines opérations complexes pour une meilleure représentation du problème.

**L'analyse et la recherche de données :** l'analyse prospective requiert entre autre un jeu de données cohérent et complet. La disponibilité de celle-ci n'est pas évidente, ce qui nécessite de croiser plusieurs sources. La donnée est généralement sous forme hétérogène, elle doit être analysée, transformée et validée. En outre, la précision des estimations va dépendre du nombre de données réellement exploitables et de leur qualité.

## Structure du modèle *TIMES-industrie*

La structure globale du modèle *TIMES-industrie* est résumée selon la figure ci-dessous. Pour satisfaire une demande finale le modèle doit réunir les facteurs de production disponibles au moindre coût en tenant compte de l'ensemble des contraintes à satisfaire. Le modèle *TIMES industrie* :

- désagrège les secteurs industriels, les opérations de production, les consommations d'énergies et de matières premières par types,
- inclut la production de chaleur et la cogénération associée. Une particularité qui assure plus de cohérence dans la représentation de l'industrie. Les cogénérations et les chaudières sont tirées par la demande en chaleur et en vapeur des technologies de production,
- décrit une base technologique nouvelle avec des spécificités régionales et sectorielles pour remplacer les technologies obsolètes,
- n'inclut pas d'effet retour sur l'économie. Les entrants et les sortants de chaque technologie de production sont spécifiés en détail,



## Les apports essentiels de notre approche

Le premier avantage de notre modèle est qu'il permet de décrire toute la chaîne de production de chaque industrie d'une manière explicite, de la matière première jusqu'au produit final. Une telle représentation permet d'apporter au décideur, une analyse pertinente sur le comportement de l'industrie. En effet, la réaction d'un secteur industriel à une contrainte donnée ne peut être interprétée que par une analyse détaillée de chaque procédé de fabrication du dit secteur.

Le second avantage réside dans les caractéristiques du modèle *TIMES*, en tant que modèle d'optimisation avec une vision parfaite du futur, il offre dans ce cadre un aperçu de l'optimalité des investissements à réaliser.

Pour finir, les possibilités offertes par ce modèle sont très larges, et nous n'avons exploré qu'un sous-ensemble. Nous avons décrit dans cette thèse plusieurs exemples de réactions des IGCE aux différentes contraintes que nous avons simulées. Ces exemples illustrent différentes façons d'exploiter les résultats obtenus.

### ***Principaux résultats d'ensemble***

Le travail de notre thèse est basé sur la simulation de l'effet de deux contraintes environnementales sur les émissions de CO<sub>2</sub> des IGCE : une contrainte sous forme de taxe (50 €/t de CO<sub>2</sub>) et une contrainte physique sur le niveau d'émission approuvable (facteur 4). Dans un premier temps, nous avons comparé, dans le cas de la France, les résultats obtenus pour notre scénario avec taxe, à ceux obtenus pour notre scénario tendanciel. Ces résultats ont servi à montrer le potentiel de notre modélisation dans l'aide à la décision d'investissements et dans l'étude de sensibilité aux variations des entrées du modèle (niveau de demande, niveau de taxe...).

On a constaté qu'avec l'application d'une taxe le mix énergétique final se transforme plus radicalement sur les 20 dernières années qu'entre 2000 et 2030 où la part du gaz naturel sur l'ensemble des combustibles passe de 18% dans le scénario tendanciel à 46% sous l'effet d'une taxe en 2050. Celle du charbon passe de 50% à 14% et l'électricité de 17% à 23%. L'application d'une taxe sur les émissions de CO<sub>2</sub> a permis des réductions de consommations énergétiques dans l'ensemble des IGCE. Cette réduction, perceptible à partir de 2035, s'établit pour l'ensemble de l'industrie à moins 19% en 2050 par rapport au scénario tendanciel.

Dans le cas de la contrainte sur le niveau d'émissions de CO<sub>2</sub> (scénario facteur 4), la part du gaz naturel, charbon et électricité dans le mix énergétique en 2050 sont respectivement 36%, 6% et 41%.

La réalisation d'un facteur 4 nécessite un chemin technologique propre en CO<sub>2</sub>, les IGCE ont répondu à cette forte contrainte par la généralisation des technologies électriques et les technologies de séquestration et stockage de CO<sub>2</sub>. L'implication de ces dernières a permis une baisse dans les émissions de CO<sub>2</sub> de près de 79% par rapport au scénario tendanciel. Par conséquent, le coût de la contrainte s'établit en 2050 à 300 €/t de CO<sub>2</sub>.

On a montré en outre une forte diversité dans les secteurs dans l'assimilation d'une contrainte facteur 4. En effet l'application d'une contrainte facteur 4 spécifique à chaque secteur à permis de voir que le ciment est le secteur le plus susceptible dans l'ensemble des secteurs à réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Ce résultat est en accord avec la minimisation du coût global actualisé qu'effectue notre modèle. Le modèle privilégie donc la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans les secteurs au coût le plus faible. Par déduction, l'industrie du ciment est celle qui représente le coût de réduction le plus faible sur l'ensemble des secteurs d'activité.

En conclusion, La contrainte sur les émissions de CO<sub>2</sub> représente un coût supplémentaire sur les coûts de production relatifs aux technologies. Plus les émissions de CO<sub>2</sub> sont élevées, plus l'effet sur le coût de production est important et plus la variation technologique au sein des secteurs industriels est Forte.

## ***Limites du modèle construit***

Les résultats présentés montrent bien la pertinence de nos choix de modélisations dans la comparaison des technologies sur le long terme selon les contraintes que l'on s'est fixé. Le modèle permet de mettre en évidence les basculements de certaines technologies et nous donne par le biais des coûts marginaux des éléments de choix autour de l'optimum. Il nous permet aussi d'obtenir un aperçu du niveau de taxe qu'il faudrait mettre en œuvre pour satisfaire une contrainte environnementale forte.

Cependant, l'ensemble des résultats obtenus ne doivent pas être interprétés sans certaines restrictions. En effet, il n'existe pas de modèle idéal, chaque modèle dépend des données dont on dispose et du cheminement que l'on s'est imposé pour le décrire. Les résultats sont alors à relativiser au cas d'étude choisi représenté par les scénarii exogènes des prix des énergies et matières première, de la demande utile et de tout paramètre macroéconomique choisi sur l'ensemble de l'horizon étudié.

Il convient donc de rappeler les limites du modèle réalisé et de tirer quelques perspectives de recherche et d'amélioration.

## **2. Perspectives**

Les principales perspectives de recherche qui apparaissent à l'issue de cette thèse concernent plus exactement les données d'entrée du modèle :

- **Scénario de demande.** On vient de voir dans le chapitre IV qu'une simple variation de la demande finale de plus ou moins 0,1%/an a conduit au total à une variation de plus ou moins 6% des consommations énergétiques en 2050. Par conséquent, développer des modèles économétriques pour estimer la croissance de la demande de chaque produits finaux ou adapter les autres modèles de type MEGC (Modèles d'équilibre générale calculable) au même contexte de notre étude (croissance, population, PIB, prix des énergies) pourra apporter une plus grande précision dans les estimations futures. En outre, intégrer les élasticités de la demande aux prix sera un plus.
- **Prix des énergies.** Adapter les scénarii de prix des énergies au même contexte des contraintes à appliquer (en prenant par exemple le modèle POLES pour générer un jeu cohérent de données). Tenir compte des scénarios de prix de combustibles diversifiés par pays voire par secteur en adaptant les coûts de transport associés et les taxes locales appliquées.
- **Taux d'actualisation.** Améliorer le taux d'actualisation pour l'adapter à chaque secteur et chaque pays en tenant compte des pays et des secteurs à fort risque.
- **Coût d'investissement des nouvelles technologies.** Confronter les données d'investissement des nouvelles technologies à d'autres sources serait un plus.
- **Durée de vie des technologies existantes.** Une représentation plus concrète de la durée de vie des technologies existantes permettrait une meilleure image de l'évolution des investissements futurs.
- **Analyse détaillée par produit finaux.** Comme dans le cas de l'industrie du papier faire une analyse désagrégé par produits finaux en tenant compte des parts de type pâte dans chaque type de produit assurerait plus de cohérence dans les estimations à réaliser.

- **Les nouveaux procédés dans l'industrie du ciment.** Dans l'industrie du ciment notre analyse a portée essentiellement sur le ciment « portland », qui est produit à partir de calcaire (80%) et de silice sous forme d'argile (20%). Leur calcination à 1450°C permet d'obtenir le clinker matière première du ciment. Cette opération de calcination produit 535kg de CO<sub>2</sub> par tonne de clinker du fait de la seule décarbonatation, il faut y ajouter environ 240kg de CO<sub>2</sub> issus des combustibles. Il existe cependant d'autres types de ciment dits « sulfoalumineux ». Les ciments sulfoalumineux sont produits à partir de calcaire, de bauxite et de sulfate de calcium, calcinés à 1300°C pour obtenir le clinker. Ce procédé produit 305kg de CO<sub>2</sub> issus de la réaction chimique par tonne de clinker et 200kg/t issus des combustibles. On voit que la production de CO<sub>2</sub> est doublement réduite : d'une part du fait de la décarbonatation et d'autre part du fait de la température de calcination notablement inférieure. De plus, les caractéristiques de ce produit font que l'énergie de broyage peut être réduite de l'ordre de 30% [Jaume, 2008].

Ce travail de thèse représente uniquement une partie du périmètre de l'industrie à étudier. Pour un modèle complet de l'industrie, il manque cependant d'associer à notre modèle : le secteur de raffinage, d'aluminium, les métaux non ferreux et l'industrie diffuse. Pour l'industrie diffuse une thèse est déjà lancée par EDF dont les résultats sont très prometteurs.



---

## **BIBLIOGRAPHIE GENERALE**

---





**[2003/96/CE]**

Directive 2003/96/CE du Conseil du 27 octobre 2003 restructurant le cadre communautaire de taxation des produits énergétiques et de l'électricité, 2003.

**[ADEME, 2005]**

Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Energie, Note de cadrage sur le contenu CO<sub>2</sub> du kWh par usage en France, 2005.

**[AIE, 1998]**

AIE, Mapping the Energy Future, Energy Modeling and Climate Change Policy, Energy and Environment, Policy Analysis Series, AIE, 1998.

**[Armatte, 2005]****A**

Armatte M., La Notion de Modèle dans les sciences Sociales, Anciennes et Nouvelles Significations, 91-123, Mathematics and Social Sciences 172, 2005.

**[Arthuis, 2005]**

Arthuis, J., La globalisation de l'économie et les délocalisations d'activité et d'emplois, Rapport d'information 416, Sénat, 2005.

**[Assoumou, 2006]**

Assoumou E., Modélisation MARKAL pour la Planification Energétique Long Terme dans le Contexte Français, thèse de l'Ecole des Mines de Paris, 2006.

**[Aubert et al., 2005]**

Aubert P., et al., Délocalisations et réductions d'effectifs dans l'industrie française, 2005.

**[Barker et al., 2007]**

Barker T. et al., Macroeconomic effects of efficiency policies for energy-intensive industries: The case of the UK Climate Change Agreements, 2000–2010, Energy Economics, 2007.

**[Barker, 2007]**

Barker T., Ekins P., Foxon T., Macroeconomic effects of efficiency policies for energy-intensive industries: The case of the UK Climate Change Agreements, 2000–2010, Energy Economics, 2007.

**B****[Berglund et al., 2006]**

Berglund C., Söderholm P., Modeling technical change in energy system analysis: analyzing the introduction of learning-by-doing in bottom-up energy models, 1344-1356, Energy policy 34, 2006.

**[Bertoldi, 2000]**

Bertoldi, P., The Use of Long Term Agreements to Improve Energy Efficiency in the Industrial Sector: Overview of the European Experiences and Proposal For a Common Framework, European Commission, 2000.

**[Beudaert, 2005]**

Beudaert M., Pollina L., Hausse des prix de l'énergie importée : des conséquences modérées sur les prix industriels, N° 1051, Insee, 2005.

**[Beudaert, 2007]**

Beudaert M., L'énergie en 2006 : nouvelles hausse des prix, recul de la consommation, N° 1152, Insee, 2007.

**[BFP, 2006]**

Bureau Fédéral du Plan, La politique Climatique post 2012, Analyses des Scénarios de réductions d'émissions de aux horizons 2020 et 2050, analyse et prévisions économiques, 2006.

**[Borges, 1986]**

Borges A. M., Applied General Equilibrium Models, an Assessment of their Usefulness for Policy Analysis, INSEAD, 1986.

**[Boulanger et al, 2003]**

Boulanger P. M., Bréchet T., Une Analyse Comparative des Classe de Modèles, Modélisation et aide à la décision pour un développement durable, Action de support PADD I, SSTC, 2003.

**[Capros, 1996]**

Capros P., PRIMES and GEM-E3 Contribution to Climate Change Policy Debate, Papier présenté au Workshop international de l'AIE sur le climat "Climate: Integrating Science, Economics, and Policy", Paris, 19-20 mars 1996.

**[CEREN, 2003a]**

Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie, Modèle de consommations d'énergie dans l'industrie en Europe, Etude Réalisée pour EDF, CEREN 2003.

**[CEREN, 2003b]**

**C** Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie, Le profil énergétique du secteur du papier et carton, Secteur 35, Enquête par enquête, EMIE 2001, 2003.

**[CEREN, 2005]**

Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie, Le profil énergétique du secteur de la métallurgie, Secteurs E15 – E16 – E17 – E18 – APE 275 et 284, Enquête par enquête, EMIE 2003, 2005.

**[CEREN, 2006]**

Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie, Le profil énergétique du secteur des matériaux de construction et du verre, Secteur E19 – E20 – E21 – E22, Enquête par enquête, EMIE 2004, 2006.

**[Chambolle, 2004]**

Chambolle T., Méaux F., Nouvelles technologies de l'énergie Rapport, 2004.

**[Chaykowski, 1998]**

Chaykowski R., Giles A., La mondialisation, le travail et les relations industrielles, Relations industrielles, VOL 53, N°1, 1998.

**[Chevalier, 2008]**

Chevalier J-M., Percebois J., Gaz et électricité : un défi pour l'Europe et pour la France, La Documentation française, 2008.

**[Coito, 2005]**

Coito F., and al., Case Study of the California Cement Industry, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.

**[COM(2005) 265]**

Livre vert sur l'efficacité énergétique ou comment consommer mieux et moins, Commission des Communautés Européennes, Bruxelles, 2007.

**[COM(2006) 105]**

Livre Vert, Une stratégie européenne pour une énergie sûre, compétitive et durable, Commission des Communautés Européennes, Bruxelles, 2006.

**[COM(2006) 545]**

Communication de la Commission, Plan d'action pour l'efficacité énergétique: réaliser le potentiel, Commission des Communautés Européennes, Bruxelles, 2007.

**[COM(2006) 676]**

Communication de la Commission au Conseil, au Parlement Européen, au Comité Économique et Social Européen et au Comité des Régions, Création d'un marché mondial du carbone - rapport en vertu de l'article 30 de la directive 2003/87/CE, Bruxelles, 2006.

**[COM(2006) 848]**

Communication de la Commission au Conseil Européen et au Parlement Européen, Feuille de route pour les sources d'énergie renouvelables au 21e siècle: construire un avenir plus durable, Commission des Communautés Européennes, Bruxelles, 2007.

**[COM(2007) 1]**

Communication de la Commission au Conseil Européen et au Parlement Européen, Une politique énergétique pour l'Europe, Commission des Communautés Européennes, Bruxelles, 2007.

**[COM(2007) 2]**

Communication de la Commission au Conseil, au Parlement Européen, au Comité Économique et Social Européen et au Comité des Régions, Limiter le réchauffement de la planète à 2 degrés Celsius, Route à suivre à l'horizon 2020 et au-delà, Bruxelles, 2007.

**[COM(2008) 16]**

Commission des communautés Européennes, Proposition de Directive du Parlement Européen et du Conseil, modifiant la directive 2003/87/CE afin d'améliorer et d'étendre le système communautaire d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre, Bruxelles, 2008.

**[CONCL 7224/1/07, 2007]**

Les conclusions de la présidence du Conseil européen de Bruxelles, Conseil Européen, Bruxelles, 2007.

**[Cosmi, 2008]**

Cosmi C., et al., A model for representing the Italian energy system: The NEEDS-TIMES experience, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2008.

**[CPCI, 2007]**

Commission Permanente de Concertation pour l'Industrie (CPCI), L'industrie française en 2006/2007, Rapport 2007.

**[CPM, 2006]**

Centre du Patrimoine Mondial, Prévisions et gestions des effets du changement climatique sur le patrimoine mondiale, Rapport commun du Centre du patrimoine mondial, des Organisations consultatives et d'un large groupe d'experts à la 30e session du Comité du patrimoine mondial, Vilnius, 2006.

**[Cribellier, 2005]**

Cribellier M., et al., La séquestration de CO<sub>2</sub>, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.

**[Criqui, 2006]**

Criqui P., Mima S., Rynikiewicz C., Prospective énergétique à 2050, contrainte carbone et changements structurels, Présentation à l'atelier « Vers une représentation des économies sous contrainte carbone », 2006.

**[Criqui, 2006a]**

Criqui P., et al., Prospective énergétique à 2050, contrainte carbone et changements structurels, Présentation à l'atelier « Vers une représentation des économies sous contrainte carbone », Fonddri, Paris, 4 avril 2006.

**[Criqui, 2007]**

Criqui P., Mima S., Scenario modeling : The Impact of the Carbon Constrained Scenarios on Steel Industry, ULCOS Trollfjord Seminar, 2007.

**[David, 2007]**

David O., Fabre A., Les économie d'énergie dans l'habitat existant une opportunité si difficile à saisir, presses de l'Ecole des Mines, Libres Opinion, 2007.

**[De Beer et al., 2001]**

De Beer J., et al., Economic Evaluation of Sectoral Emission Reduction Objectives for Climate Change Economic, Evaluation of Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Emission Reductions in Industry in the EU, Bottom-up Analysis, AEA Technology Environment, UK, 2001.

**[de Beer, 2000]**

de Beer J., Potential for Industrial Energy Efficiency Improvement in the Long Term, Eco-Efficiency in Industry and Science, Kluwer Academic publishers, London, 2000.

**[de Boissieu, 2006]**

de Boissieu C., Rapport du Groupe de travail « Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050 », Plan, 2006.

**[De Miglio, 2006]**

De Miglio R., Gargiulo M., Lavagno E., Integration of comprehensive analysis with sub-system and component modelling tools for local energy planning. Politecnico di Torino – Energy Department, Torino, ITALY, 2006.

**D [Delattre, 2005]**

Delattre F., Veron A., Taux d'actualisation public et calcul économique, Diagnostics Prévisions et Analyses Économiques N° 84 , 2005.

**[Deleau et al, 1986]**

Artus P., Deleau M., Malgrange P. (1986), Modélisation macroéconomique, Economica, Collection Economie et Statistiques Avancées, Paris.

**[DGEMP, 2003]**

Direction Générale des Energies et des Matières Premières, L'évolution de l'intensité énergétique et des économies d'énergie en France entre 1973 et 2001, 2003.

**[DGEMP, 2004]**

Direction générale de l'énergie et des matières premières, Observatoire de l'énergie, Scénario énergétique tendanciel à 2030 pour la France, 2004.

**[DGEMP, 2005]**

Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières, Etude pour une prospective énergétique concernant la France, 2005.

**[DGEMP, 2007]**

Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières (DGEMP), Observatoire de l'Énergie, Bilan énergétique de l'année 2006 de la France, 2007.

**[Directive 2003/87/CE]**

Directive du 13 octobre 2003, établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté et modifiant la directive 96/61/CE du Conseil, Journal officiel de l'Union européenne, 2003.

**[DIRECTIVE 2004/101/CE]**

Directive 2004/101/CE du Parlement Européen et du Conseil du 27 octobre 2004 modifiant la directive 2003/87/CE établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté, au titre des mécanismes de projet du protocole de Kyoto.

**[Directive 2006/32/CE]**

Directive du 05 avril 2006, relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques et abrogeant la directive 93/76/CEE du Conseil, Journal officiel de l'Union européenne, 2006.

**[DOE/EIA, 2003]**

Model Documentation Report: System for the Analysis of Global Energy Markets (SAGE), Volume 1, 2, 2003.

**[Dornau, 2005]**

Dornau R., The Emissions Trading Scheme of the European Union, Oxford university press, Oxford, 2005.

**[EEA report, 2007]**

Greenhouse gas emission trends and projections in Europe, Tracking progress towards Kyoto targets, European Environment Agency, 2007.

**[Egenhofer, 2005]**

Egenhofer C., et al., Business Consequences of the EU Emissions Trading Scheme. Centre for European Policy Studies, Brussels, 2005.

**[Egenhofer, 2007]**

**E** Egenhofer C., The making of the EU Emissions Trading Scheme : Status, Prospects and implications for business, European Management Journal Vol. 25, N° 6, PP. 453-463, 2007.

**[EIA, 2004]**

EIA, Model Documentation Report: Industrial Sector Demand Module of the National Energy Modeling System, Office of Integrated Analysis and Forecasting, Energy Information Administration, 2004.

**[El Mouhoub, 2008]**

Mouhoub M., Mondialisation et délocalisation des entreprises, La découverte, 2008.

**[Ellerman et al., 2007]**

Ellerman A. D., Buchner B. K., The European Union Emissions Trading Scheme: Origins, Allocation, and Early Results, Environment Economic and Policy, 2007; 1: 66-87.

**[Escarnot, 2007]**

Escarnot B., Escudero M., Bethenod C., Hita A., Pham-Van-Cang C., Morisset V., Prévisions de consommation d'électricité et de gaz naturel des industries grandes consommatrices d'énergie en France, Rapport technique interne à EDF, Eco-efficacité et Procédés industriels, Expertise Clients et Secteurs Industriels, 2007.

**[Ferrandéry, 1996]**

Ferrandéry J L., Le point sur la mondialisation, PUF, Paris, 1996.

**[Finon, 2003]**

Finon D., Prospectives énergétiques et modélisation, Note au conseil scientifique de l'institut français de l'énergie, 2003.

**F [Finon, 2004]**

Finon D., Prospective énergétique et modélisation de long terme, Les voies de progression méthodologique, 3-15, Revue de l'Energie 553, 2004.

**[Fishbone et al, 1983]**

Fishbone L. G., et al., User's Guide for MARKAL (BNL/KFA Version 2.0), A Multi-period, Linear-programming Model for Energy Systems Analysis, IEA, ETSAP, 1983.

**[GEO-3, 2002]**

Global Environmental Outlook 3, United Nations Environment Programme, 2002.

**[GEO-4, 2007]**

Global Environmental Outlook 4, United Nations Environment Programme, 2007.

**[GIEC, 2007]**

Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC), Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007: Synthesis Report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007.

**G [Gielen, 2006]**

Gielen D., Tam C., Energy use, technologies and CO<sub>2</sub> emissions in the pulp and paper industry. Paper prepared for the workshop "Energy efficient technologies and CO<sub>2</sub> reduction potentials in the pulp and paper industry". IEA, 2006.

**[Gielen, 2007]**

Gielen D., Taylor M., Modelling industrial energy use: The IEAs Energy Technology Perspectives, Energy economics, 2007.



**[Giraud, 2000]**

Giraud P-N., Un scénario énergétique tendanciel pour la France à l'horizon 2020, CERNA, Centre d'économie industrielle, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2000.

**[GRACES, 2006]**

Groupe de Réflexion Académies et Conseil Economique et Social, Partager la connaissance et ouvrir le dialogue : le changement climatique, 2006.

**[Groenenberga, 2004]**

Groenenberga H., Blokb K., van der Sluijsb J., Projection of energy-intensive material production for bottom-up scenario building, Ecological Economics, 2004 .

**[Gusbin, 2004]**

Gusbin D., Hoornaert B., Perspectives énergétiques pour la Belgique à l'horizon 2030, le Bureau Fédéral du Plan, 2004.

**[Harro, 2006]**

Harro V., Biermann F., European emissions trading and the international competitiveness of energy-intensive industries: a legal and political evaluation of possible supporting measures, Energy Policy, 2006.

**[Hendriks, 2004]****H**

Hendriks C., Gauss W., Global Carbon Dioxide Storage Potential and Costs, Ecofys in Cooperation with TNO, 2004.

**[Hourcade, 2003]**

Hourcade J-C., Lecocq F., Le taux d'actualisation contre le principe de précaution ? Leçon à partir du cas des politiques climatiques, L'actualité économique, Vol 80, p. 41-65, 2004.

**[IP/07/1612]**

Commission Européenne, Échange de quotas d'émission: la Commission approuve les plans nationaux d'allocation de la Roumanie pour l'année 2007 et pour la période 2008-2012, Bruxelles, 2007.

**[IP/07/1617]****I**

Commission Européenne, Échange de droits d'émission: la Commission annonce le couplage du système mis en place par l'Union européenne avec ceux de la Norvège, de l'Islande et du Liechtenstein, Bruxelles, 2007.

**[Isaias et al., 2005]**

Isaias J., et al., Portée et effets de la délocalisation d'entreprises, Comité économique et social européen, Bruxelles, 2005.

**[Jaume, 2008]****J**

Jaume R., Technologies MDE dans l'industrie du ciment, Note interne EDF, 2008.

**[Ji Raina, 2002]**

Ji Raina S., Energy Efficiency Improvement in Indian Cement Industry, IIPEC Programme, 2002.

**[Khurana, 2001]**

- K** Khurana S. et al., Energy balance and cogeneration for a cement plant, Applied Thermal Engineering, 2001.

**[Le Henaff, 2005]**

Le henaff C., Pignon V., « Compréhension des modèles d'équilibre general calculable et leur portée dans les couplages avec des modèles technico-économiques », EDF, 2005.

**[Lebègue, 2005]**

Lebègue D., Hirtzman P., Baumstark L., Le prix du temps et la décision publique, révision du taux d'actualisation public, Commissariat Général au Plan, 2005.

**[Lecarpentier, 2003]**

Lecarpentier J., Kassabji F., Evolution of the Energy demande in the Cement Industry of tomorrow, Europäisches Institut für Energieforschung, Electricité de France / Universität Karlsruhe (TH) EWIV, 2003.

**[Lorna et al, 2007]**

- L** Lorna A. G., et al., Modeling of industrial energy consumption: An introduction and context, 599-608, Energy Economics, 2007.

**[Löschel, 2002]**

Löschel A., Technological change in economic models of environmental policy: a survey, 105-126, Ecological Economics 43, 2002.

**[Loulou at al, 2004]**

Loulou R., et al., Documentation for the MARKAL model, ETSAP, 2004.

**[Loulou et al, 1997]**

Loulou R., et al., Prospective énergétique au Québec, Le modèle MARKAL-Québec, GERAD, 1997.

**[Loulou et al, 2005]**

Loulou R., et al., Documentation for the TIMES model Partie 1, 2, 3, ETSAP, 2005.

**[Martin, 1999]**

- M** Martin N., et al., Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions Reduction Opportunities in the U.S. Cement Industry, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.

**[Martin, 2000]**

Martin N., et al, Emerging Energy Efficient Industrial Technologies, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.

**[Martin, 2007]**

Martin K., et al., Decoupling of industrial energy consumption and CO2 emissions in energy intensive industries in Scandinavia, Energy economics; 29: 665-692.

**[MEDAD, 2007]**

Ministère de l'Ecologie du Développement et de l'Aménagement Durables, CO<sub>2</sub> et énergie France et Monde, 2007.

**[Mocilnikar, 2007]**

Mocilnikar A-T., Le post-Kyoto nécessitera-t-il un nouveau Bretton Woods du Carbone ?, 2007.

**[Montan und Wirtschaftsverlag, 2005]**

Handbook of the European Iron and Steel Works, 2005.

**[Montmarquette, 2007]**

Montmarquette C., Scott I., Le taux d'actualisation pour l'évaluation des investissements publics au Québec, centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations, 2007.

**[Murphy et al, 2007]**

Murphy R., et al., Hybrid modeling of industrial energy consumption and greenhouse gas emissions with an application to Canada, 826-846, Energy Economics, 2007.

**[Neelis et al., 2007]**

Neelis M., et al., Energy efficiency developments in the Dutch energy-intensive manufacturing industry, 1980–2003, Energy Policy, 2007.

**[Neelisa, 2007]**

**N** Neelisa M., et al., Boonekamp Energy efficiency developments in the Dutch energy-intensive manufacturing industry, 1980–2003, Energy Policy, 2007.

**[Norbet et al., 2004]**

Norbet A., et al., CO2-Emission Trading and Green Markets for Renewable Electricity, RISO National Laboratory, Denmark, 2004.

**[Oberndorfer, 2006]**

**O** Oberndorfer U., et al., The Impacts of the European Emissions Trading Scheme on Competitiveness and Employment in Europe – a Literatures Review, A report commissioned by World Wide Fund for Nature (WWF), 2006.

**[Odyssee, 2007]**

Intelligent Energy Europe, Evaluation of Energy Efficiency in the EU: Indicators and Measures, ADEME Editions, Paris, 2007.

**[OECD, 2001]**

OECD, An Initial View on methodologies for Emission Baselines: Iron and Steel Case Study, Organisation for Economic Co-operation and Development and International Energy Agency, 2001.

**[Percebois, 2007a]**

Percebois J., Dépendance et vulnérabilité : deux façons connexes mais différentes d'aborder les risques énergétiques, Revue de l'ISMEA, 2006.

**[Percebois, 2007b]**

Percebois J., Energy vulnerability: a multi-facet concept, International Journal of Energy Sector Management, 2007.

**[Percebois, 2007c]**

Percebois J., Les perspectives d'approvisionnement de l'Europe en gaz naturel, présentation au séminaire international France - Amérique Latine et Caraïbes, Géopolitique ; sécurité et durabilité : transition vers un nouvel ordre énergétique mondial, Santiago du Chili, 2007.

**P [Pocklington, 2002]**

Pocklington D., Européen Emissions Trading: The business perspective, Européen Environmental Law, 2002.

**[Price, 2006]**

Price L., Prospects for Efficiency Improvements in China's Cement Sector, personal presentation at Cement Energy Efficiency Workshop Organised by IEA in cooperation with WBCSD, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2006.

**[Protocole de Kyoto, 1998]**

Protocole de Kyoto à la Convention Cadre des nations Unies sur les Changements Climatiques, Nations Unies, 1998.

**[Radanne, 2004]**

Radanne P., La division par 4 des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050, Ministère de l'Ecologie du Développement Durable, 2004.

**R [RA-FMI, 2007]**

Fonds Monétaire International, Rapport Annuel, l'économie mondiale au service de tous, 2007.

**[Reinaud, 2005]**

Reinaud J., Industrial competitiveness under the European Union Emissions Trading Scheme, International Energy Agency, Paris, 2005.

**[Rich, 2004]**

Rich D., Climat Change, Carbon Taxes, and International Trade: An Analysis of the Emerging Conflict between the Kyoto Protocol and the WTO, Environmental Economics and Policy 131, Globalization and the Natural Environment, 2004.

**[Ross, 2004]**

Ross P., et al., Glass Melting Technology: A Technical and Economic Assessment, Glass Industry Consulting International, 2004.

**[RP-FMI, 2007]**

Fonds Monétaire International, Etudes économiques et financières, Perspective de l'économie mondiale, Mondialisation et inégalité, 2007.

**[M. Rue, 2006]**

M. Rue D., et al, Industrial Glass Bandwidth Analysis, Gas Technology Institute, Energy Utilization Center, 2006.

**[Ruth, 2000]**

Ruth M., et al., Evaluating Clean Development Mechanism Projects in the Cement Industry Using a Process-Step Benchmarking Approach, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.

**[Rutha, 2003]**

Rutha M., Davidsdottir B., Amatoc A., Climate change policies and capital vintage effects: the cases of US pulp and paper, iron and steel, and ethylene, Environmental Management, 2003.

**[Rynikiewicz, 2005]**

Rynikiewicz C., Criqui P., Scenarios of energy and environment futures impacting the selection and diffusion of ULCOS technologies, Paper presented at the 2nd ULCOS Seminar 2005 – Aveiro 21-22nd september, Portugal.

**[Sessi, 2007]**

Ministère de l'Economie des Finances et de l'Emploi, Face à la hausse des prix des énergies fossiles puis de l'électricité, l'industrie manufacturière a amélioré sa performance énergétique, les 04 pages des statistiques industrielles, Sessi, 2007.

**S****[Sijm, 2005]**

Sijm J., et al., CO2 Prices dynamics: the implications of EU Emissions Trading Scheme on the price of electricity. ECN report ECN-C-05-081, Energy Research Center of the Netherlands, 2005.

**[Simonet, 2007]**

Simonet J., Les cadres et la mondialisation, Les Cahiers Bernard Brunhes, 2007.

**[Soria, 2000]**

Soria A., Climate Technology Strategy within Competitive Energy Markets Energy Technology Strategy 1995-2030: Opportunities Arising from the Threat of Climate Change, IPTS, 2000.

**[Syrota et al., 2007]**

Syrota J., et al., Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050, Rapport de synthèse, Centre d'analyse stratégiques, 2007.

**[Tuddenham, 2006]****T**

Tuddenham M., Historique Facteur 4 , Groupe Facteur , CITEPA, 2006.

**[Utlu, 2006]**

Utlu Z., et al., Energy and exergy analyses of a raw mill in a cement production, Applied Thermal Engineering, 2006.

**U****[Uyterlinde, 2007]**

Uyterlinde M.A., et al., A sustainable energy system in 2050: promise or possibility? A vision by ECN and NRG, 2007.

**[Van Asselt et al., 2007]**

Harro Van Asselt, Frank Biermann, European Emission Trading and the international competitiveness of energy intensive industries: a legal and political evaluation of possible supporting measures, Energy Policy 35 (2007), 497-506.

**[Van Asselt, 2006]**

Van Asselt H., Biermann F., European emissions trading and the international competitiveness of energy-intensive industries: a legal and political evaluation of possible supporting measures, Energy Policy 2006.

**[Van Iersel et al., 2006]****V**

Van Iersel J., Calvet Chambon E., Rapport d'information de la Commission consultative des Mutations industrielles, Une étude sectorielle des délocalisations, Comité économique et social européen, Bruxelles, 2006.

**[Van Regemorter, 2006]**

Van Regemorter D., Kanudia A., Projections of the demand of energy services, New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS), document technique interne pour les pays européens intégrant le projet NEEDS, 2006.

**[Wang, 2008]**

Wang J., et al., Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry, Applied Energy, 2008.

**[WEC, 2007]**

World Energy Council, Carbon Capture and Storage: a WEC “Interim Balance”, 2007.

**[Weizsäcker, 1997]**

Weizsäcker E U., Lovins A B., Lovins L H., Factor 4 : Doubling wealth – halving resource use : a report to the Club of Rome, Earthscan Publications, Londres, 1997.

**[Worrell, 2004]**

**W** Worrell E., Galitsky C., Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers, Environmental Energy Technologies Division, Sponsored by the U.S. Environmental Protection Agency, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.

**[Worrell, 2007]**

Worrell E., et al., Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Glass Industry An Energy Star Guide for Energy and Plant Managers, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007.

**[Worrell, 2007]**

Worrell E., et al., World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007.

---

## ***AVERTISSEMENT***

**Pour des raisons de confidentialité et de droit de reproduction de données technico-économiques, EDF R&D a souhaité masquer certaines données dans la présentation des secteurs industriels, en particulier les données CEREN, ULCOS et interne EDF.**

---

---

## ***ANNEXE I***

## ***L'INDUSTRIE DU PAPIER***

---



**ABREVIATIONS**

AIE	Agence Internationale de l'Energie
BREF	Reference Document on Best Available Techniques in the Pulp & Paper industry
BL	Black Liquor
CTP	Centre Technique du papier
CEPI	Confederation of European Paper Industry
COPACEL	Confédération Française de l'Industrie des Papiers, Cartons et Celluloses
CMA	Centre de Mathématiques Appliquées
CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide
COA	Coal
CTMP	Chimicothermomechanicalpulp
EFOM	Energy Flow Optimization Model
ELC	Electricity Consumption
EPA	US Environmental Protection Agency
ETSAP	Energy Technology Systems Analysis Programme (Consortium AIE pour developper MARKAL)
FOL	Fuel Oil
GWh	Giga Watt heure
GERAD	Groupe d'Etudes et de Recherche en analyse des Décisions
GHG	Green House Gas
GASNAT	Natural Gas
HTH	Heat Consumption
IGCC	Integrated Gasification Gas Combined Cycles
MARKAL	MARKet ALlocation
Mt	Million de tonnes
PEN	Permis d'Emission Négociables
PJ	Peta Joules
PLP	Pulp production
PLPIMP	Imported Pulp
PPR	Paper production
RCYPPR	Recycled Paper
RES	Reference Energy System
SAGE	System for Analysis of Global Energy
SESSI	Le Service des Etudes et des Statistiques Industrielles
TIMES	The Integrated MARKAL EFOM System
TMP	Thermomechanicalpulp
TCC	Turbine à Cycle Combiné
VTT	Centre de Recherche Technique de Finlande
WOO	Wood
NAOH	Hydroxyde de Sodium
KAO	Kaolin
GYPS	Gypse
HYD	EAU (Hydraulique)

**TABLE DES MATIERES**

<b>1. DESCRIPTION DU SECTEUR.....</b>	<b>213</b>
1.1. L'INDUSTRIE PAPETIERE EN QUELQUES CHIFFRES .....	213
1.2. DESCRIPTION DES PROCEDES DE FABRICATION .....	214
1.2.1. Pâte Mécanique.....	214
1.2.1.1. Procédé SGW, PGW .....	215
1.2.1.2. Procédé RMP .....	215
1.2.1.3. Procédé TMP .....	215
1.2.1.4. Procédé CTMP et CMP .....	216
1.2.2. Pâte Chimique .....	216
1.2.2.1. Le Procédé Kraft.....	217
1.2.2.2. Procédé Bisulfite (Acide).....	217
1.2.3. La machine à Papier .....	218
1.3. LE SYSTEME ENERGETIQUE DE REFERENCE (RES) .....	220
<b>2. LES DONNEES STATISTIQUES UTILISEES COMME ENTREES DU MODELE.....</b>	<b>221</b>
2.1. LES NOUVELLES TECHNOLOGIES .....	221
2.1.1. Fabrication du papier .....	222
2.1.1.1. Formation sèche de la feuille (Dry Sheet Forming) .....	222
2.1.1.2. Presse à Séchage (Press Drying) .....	223
2.1.1.3. Ceinture de séchage à condensation (Condebelt) .....	224
2.1.1.4. Pressage à très haute température (Impulse Drying) .....	225
2.1.1.5. Séchage avec application d'air (Air Impingement Drying) .....	226
2.1.1.6. Séchage Airless (Airless Drying) .....	227
2.1.1.7. Séchage avec application de vapeur (Steam Impingement Drying) .....	228
2.1.1.8. Optimisation de sécherie .....	229
2.1.1.9. Amélioration de section de presse.....	230
2.1.1.10. Fermeture des Hottes .....	230
2.1.1.11. Autres .....	231
2.1.2. Production de la pâte .....	232
2.1.2.1. Pâte mécanique biotechnologique (BIOPULPING) .....	232
2.1.2.2. Traitement à Enzyme (ENZYME-AIDED REFINING) .....	233
2.1.2.3. Pâte mécanique TMP (RTS et Thermopulp) .....	234
2.1.2.4. Optimisation des pâtes chimiques .....	234
2.2. LES DONNEES DE PRODUCTION.....	235
2.2.1. La France .....	235
2.2.2. Le reste de l'Europe .....	236
2.3. LES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES .....	240
2.3.1. La France .....	240
2.3.2. Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières.....	242
2.3.3. Consommation en GWh et puissance installée en MW des cogénérations et turbines.....	244
2.3.4. Le reste de l'Europe .....	245
2.4. LES INSTALLATIONS DE PRODUCTION DE CHALEUR ET D'ELECTRICITE DISPONIBLES .....	247
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>249</b>

➤ **TABLEAUX**

Tableau 1 : Industrie de papiers et cartons .....	213
Tableau 2 : Industrie de la Pâte à papier .....	214
Tableau 3 : Description du Procédé Mécanique.....	215
Tableau 4 : Description du procédé Thermomécanique.....	216
Tableau 5 : Description du procédé chimicothermomécanique .....	216
Tableau 6 : Description du procédé Chimique .....	218
Tableau 7 : Description des différents types de machine à papier .....	220
Tableau 8 : Description du procédé formation sèche de la feuille .....	223
Tableau 9 : Description de la technologie presse à séchage.....	224

Tableau 10 : Description de la technologie ceinture de séchage à condensation .....	225
Tableau 11 : Description de la technologie séchage à impulsion.....	226
Tableau 12 : Description de la technologie séchage avec application d'air .....	227
Tableau 13 : Description de la technologie séchage airless .....	228
Tableau 14 : Description de la technologie séchage avec application de vapeur .....	229
Tableau 15 : Description du procédé de production de papier avec optimisation de sécherie .....	230
Tableau 16 : Description du procédé de papier avec amélioration de la section de presse .....	230
Tableau 17 : Description du procédé de papier avec la fermeture de hottes .....	231
Tableau 18 : Potentiel d'économie d'énergie pour la production de papier .....	231
Tableau 19 : Améliorations diverses .....	231
Tableau 20 : Description de la technologie biopulping .....	233
Tableau 21 : Description de la technologie à Enzymes.....	234
Tableau 22 : Description de la technologie RTS .....	234
Tableau 23 : Description du procédé de la pâte avec optimisation de la pâte chimique .....	235
Tableau 24 : Productions de l'industrie papetière en Mt, année 2001.....	235
Tableau 25 : Production de l'industrie papetière en Mt .....	240
Tableau 26 : Répartition des spéciaux par énergie et par segment en TWh, 2001 .....	241
Tableau 27 : Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières par segment industriel .....	243
Tableau 28 : Consommation en GWh et puissance installée en MW des installations de cogénération et turbines .....	244
Tableau 29 : Consommation énergétique par pays de l'industrie papetière en GWh.....	247
Tableau 30 : Nouvelles chaudières installées .....	247
Tableau 31 : Nouvelles Turbines installées.....	248
Tableau 32 : Nouvelles cogeneration installées .....	248
Tableau 33 : Installations type de 5MWth .....	249

### ➤ FIGURES

Figure 1 : Procédé de fabrication de la Pâte Mécanique .....	215
Figure 2 : Procédé de fabrication de la Pâte Chimique .....	217
Figure 3: Procédé de fabrication, Machine à Papier.....	218
Figure 4 : Le système énergétique de référence de l'industrie du papier .....	220
Figure 5: Le système énergétique de référence pédagogique pour l'industrie du papier en France.....	221
Figure 6 : schéma descriptif de la technologie presse à séchage.....	224
Figure 7 : schéma de la technologie ceinture de séchage à condensation .....	225
Figure 8 : Technologie séchage à impulsion .....	226
Figure 9 : Technologie séchage avec application d'air .....	227
Figure 10 : Technologie de séchage sans air (Airless) .....	228
Figure 11 : Schéma sommaire du procédé biopulping .....	232
Figure 12 : Schéma sommaire de la technologie à Enzymes [ <i>Kallionen &amp; Al., 2003</i> ].....	233
Figure 13 : Consommation par type de combustible de l'industrie papetière (TWh) .....	241
Figure 14 : Répartition des consommations énergétiques par opération .....	242

# 1. Description du secteur

## 1.1. L'industrie papetière en quelques chiffres<sup>1</sup>

L'activité dans l'industrie papetière en France a connu une nette croissance en 2004 soit une progression de 3,1% par rapport à 2003, la production a atteint 10 249 Kt. En moyenne la production papetière française a progressée de 2,7% par an depuis 1990. Le volume total des exportations a progressé de 7,6% au cours de l'année 2004, soit 5 731 Kt ce qui représente 55,9% de la production totale. Les importations représentent 64% de la production totale, soit 6 561 Kt.

Avec 11 079 Kt, l'année 2004 a marqué le retour à la croissance de la consommation de papiers et cartons en France. Ce niveau de consommation reste toujours inférieur à celui réalisé en 2000 (11 378 Kt). Le taux de croissance annuel moyen (TCAM) est de 1,6% depuis 1990. Cette reprise s'est effectuée à des rythmes différents selon les types de papiers et cartons. La consommation de papiers à usages graphiques s'établit à 5 556 Kt en 2004, soit un taux de croissance de 2,3% par an depuis 1999 ; la consommation de papiers cartons pour emballages et conditionnement s'établit à 4 752 Kt en 2004 et à 761 Kt pour les papiers d'hygiène, soit respectivement un taux de croissance de 1% et de 3,6 % par an depuis 1990.

	1994	2000	2001	2002	2003	2004	% variation 04/03
Nombre d'entreprise	117	105	105	103	102	100	-2
Nombre d'usine	146	131	129	127	126	124	-1,6
Nombre de machines active	240	221	218	214	213	208	-2,3
Personnel employé	23763	21400	21533	21294	20902	20002	-4,3
Production (Kt)	8682	10006	9624	9801	9939	10249	3,1
importation (Kt)	4780	63925	6057	6060	6244	6561	5,1
Exportations (Kt)	3741	5020	4822	4974	5324	5731	7,6
Consommation apparente (Kt)	9721	11378	10859	10887	10859	11079	2
Consommation per capita (Kg)	167,8	187,5	177,9	177,2	175,7	178,2	1,4
Capacité (Kt)	9370	10650	10859	11100	11700	12000	2,6
Valeur HT de la production (M€)	5223	6794	6595	6389	6106	6031	-1,2
Investissements (M€)	282	569	540	480	570	600	5,3
Consommation de pâte (Kt)	4249	4169	3912	3956	3978	4139	4
Réception des pâtes importée (Kt)	1894	2109	1994	2007	1919	1967	2,5
Consommation, Papiers recyclés	4063	5775	5572	5705	5781	5942	0
Taux d'utilisation des papiers recyclés (%)	46,8	57,7	57,9	58,2	58,2	58	-0,3

Source : Rapport économique et statistique, COPACEL, 2004.

**Tableau 1 : Industrie de papiers et cartons**

<sup>1</sup> Cette partie de l'article se base sur le Rapport économique et statistique de la COPACEL, 2004. Les valeurs de cette partie ne correspondent pas aux valeurs du modèle car le périmètre considéré dans le modèle est plus large.

	1994	2000	2001	2002	2003	2004	% variation 04/03
Nombre d'entreprise	17	17	17	16	16	16	0
Nombre d'usine	20	18	18	17	17	17	0
Intégrées	15	13	13	12	12	12	0
Non intégrées	5	5	5	5	5	5	
Personnel employé	3019	2266	2293	2300	2265	2305	1,8
Production (Kt)	2787	2469	2327	2427	2471	2547	3,1
importation (Kt)	1984	2283	2075	2096	2037	2098	3
Exportations (Kt)	443	426	538	588	590	595	0,8
Valeur HT de la production (M€)	1061	1155	893	810	782	785	0,4
Consommation de bois (Kt)	9797	8715	8110	8266	8431	8858	5,1

Source : Rapport économique et statistique, COPACEL, 2004

**Tableau 2 : Industrie de la Pâte à papier**

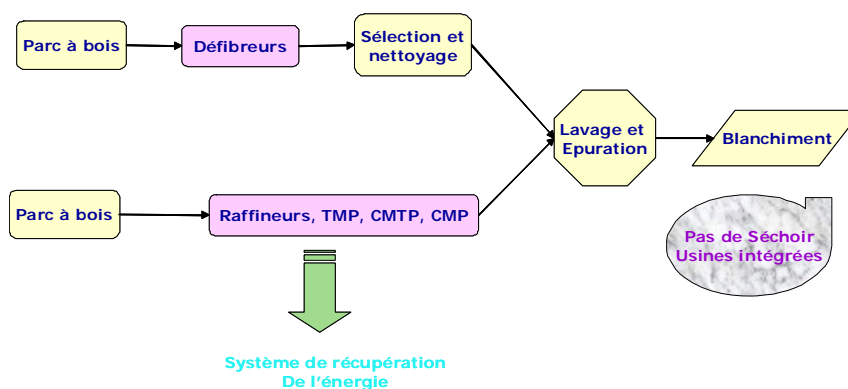
## 1.2. Description des procédés de fabrication

Il existe deux grands types de procédés pour la fabrication de pâte à papier : les procédés mécaniques et les procédés chimiques. Ces deux procédés se distinguent par la qualité des fibres produites. Cependant le résultat final est presque le même, car le but est de fabriquer une pâte qui est utilisée comme matière première pour la fabrication du papier. Les procédés mécaniques ont pour but de séparer les fibres mécaniquement avec des meules ou des raffineurs sans perte excessive de matière, tandis que les procédés chimiques sont basés sur l'action des produits chimiques pour extraire les fibres du bois (dissolution de la lignine).

### 1.2.1. Pâte Mécanique

Il existe de nombreux procédés mécaniques qui peuvent se classer en trois grandes catégories :

- Les procédés mécaniques utilisant une meule abrasive en rotation, soit à pression atmosphérique (**SGW** Stone Ground Wood), soit sous pression (**PGW** Pressure Ground Wood).
- Les procédés mécaniques utilisant des raffineurs à disque, sans traitement chimique ou thermique du bois (**RMP** Refined Mechanical Pulp).
- Les procédés mécaniques utilisant des disques avec traitement chimique, thermique du bois ou les deux en même temps (**TMP** Thermo-MechanicalPulp, **CTMP** Chimico-ThermoMechanicalPulp, **CMP** Chimico-MechanicalPulp).



**Figure 1 : Procédé de fabrication de la Pâte Mécanique**

#### 1.2.1.1. Procédé SGW, PGW

Dans le cadre de ce procédé on utilise des défibreurs à meule : les rondins du bois, préalablement écorcés sont soumis à l'action d'une meule abrasive en rotation. La meule comporte en surface des grains abrasifs qui viennent en contact avec la surface du bois. Chaque fibre est soumise à des forces de compression et de traction quand le grain de la meule passe sur elle. Une fois les fibres séparées, la pâte est éliminée de la surface de la meule par des rinceurs et recueillie dans une fosse sous le défibreur avant d'être triée et épurée.

#### 1.2.1.2. Procédé RMP

Le procédé est basé sur l'emploi de disques possédant des lames et des rainures particulières en rotation, qui séparent les fibres de la structure initiale. Les particules de bois, lors de leur passage sur les lames des disques, subissent des cycles répétés de compression et de détente. Ces cycles réalisés en présence d'eau provoquent une absorption d'énergie qui entraîne la rupture mécanique des liaisons qui maintiennent les fibres ensemble.

Nom de la Technologie	Pâte mécanique (SGW, PGW, RMP)	Source
Code TIMES	IPPMCPLP	
<u>Inputs</u>	<u>Ratio</u>	-
Bois		
Énergie Calorifique		CEREN, 2003
Electricité		CEREN, 2003
<u>Outputs</u>		
Pâte à Papier	1000 kg	
Durée de vie	30	
C Investissement	500 €t (Hypothèse)	
Coûts fixes	15 €t	Voith
Coûts Variables	10 €t	Voith
Rendement	0,9	Technique de l'ingénieur

**Tableau 3 : Description du Procédé Mécanique**

#### 1.2.1.3. Procédé TMP

Les propriétés mécaniques des pâtes peuvent être améliorées en soumettant les copeaux, avant le traitement mécanique, à un traitement thermique par la vapeur à une température supérieure à 100°C (généralement comprise entre 110 et 130°C) et en réalisant le premier stade dit de défibrage sous pression (2 à 3 bars).

La pâte est grossière, avec de nombreuses bûchettes, et nécessite donc un deuxième traitement

mécanique appelé raffinage. Ce dernier peut être effectué sous pression ou à pression atmosphérique.

Nom de la Technologie	Pâte Thermomécanique (TMP)	Source
Code TIMES	IPPTHMCPLP	
<u>Inputs</u>	<u>Ratio</u>	-
Bois Énergie Calorifique Electricité		CEREN, 2003 CEREN, 2003
<u>Outputs</u>		
Pâte à Papier	1000 kg	
Durée de vie	30	
C Investissement	465 €/t	Stora Enzo
Coûts fixes	15 €/t	Voith
Coûts Variables	10 €/t	Voith
Rendement	0,9	Technique de l'ingénieur

**Tableau 4 : Description du procédé Thermomécanique**

#### 1.2.1.4. Procédé CTMP et CMP

Toujours pour améliorer les caractéristiques de la pâte en vue d'une utilisation pour des papiers de qualité supérieure, l'utilisation de produits chimiques pour le traitement des copeaux a conduit au développement de ces procédés. Ainsi, les traitements mécaniques, thermique et chimique sont combinés. Le traitement chimique favorise le défibrage et rend la lignine plus hydrophile. Après traitement mécanique, les fibres sont plus longues, plus souples et possèdent donc des meilleures caractéristiques.

Selon l'importance du traitement chimique (température et durée), le rendement est plus ou moins élevé et conditionne la dénomination CTMP et CMP. Les pâtes CTMP sont généralement produites à 120 – 130°C pendant 15 à 30 minutes alors que pour les pâtes CMP, la température est plus élevée (150 à 170°C) pendant une durée pouvant être supérieure à une heure.

Nom de la Technologie	Pâte Chimicothermomécanique (CTMP)	Source
Code TIMES	IPPTHMCPLP	
<u>Inputs</u>	<u>Ratio</u>	-
Bois Énergie Calorifique Electricité		CEREN, 2003 CEREN, 2003
<u>Outputs</u>		
Pâte à Papier	1000 kg	
Durée de vie	30	
C Investissement	1007 €/t	Cahiers du GERAD
Coûts fixes	35 €/t	Cahiers du GERAD
Coûts Variables	28 €/t	Cahiers du GERAD
Rendement	0,9	Technique de l'ingénieur

**Tableau 5 : Description du procédé chimicothermomécanique**

#### 1.2.2. Pâte Chimique

Les pâtes chimiques représentent la majeure partie de la production mondiale de pâtes à papier et sont utilisées dans presque toutes les qualités de papiers et cartons.

Le but principal de ces procédés est de dissoudre et d'extraire la lignine de la paroi des fibres par un traitement chimique. On distingue deux types de procédés : les procédés au sulfate ou procédés Kraft (Alcalins) et les procédés de fabrication bisulfite (Acide).

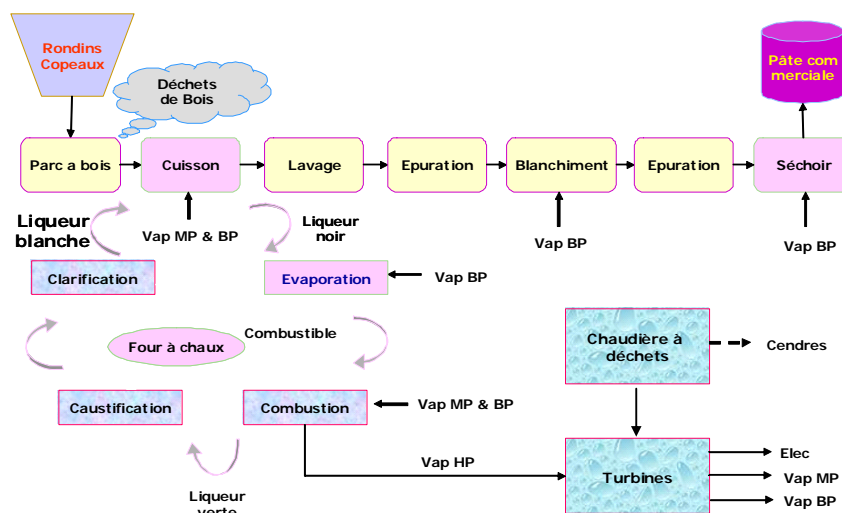


Figure 2 : Procédé de fabrication de la Pâte Chimique

### 1.2.2.1. Le Procédé Kraft

Le Procédé Kraft est le plus utilisé dans le monde, il est basé sur l'utilisation de soude et de sulfure de sodium. Le traitement chimique des copeaux se fait à 170-175°C pendant une durée de 2 à 5h dépendant de la matière première employée. La cuisson est réalisée dans un réacteur vertical où les copeaux descendent par gravité et sont mélangés aux diverses liqueurs de cuisson. Le sulfure de sodium est préparé directement à partir du sulfate de sodium  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  par combustion. Lors de la cuisson, le sulfure de sodium est hydrolysé en soude, en  $\text{NaHS}$  et en  $\text{H}_2\text{S}$ . Les différents composés soufrés présents réagissent avec la lignine pour donner des thioglignines plus facilement solubles. La liqueur appliquée aux copeaux est appelée liqueur blanche. La liqueur extraite du réacteur ou lessiveur est appelée liqueur noire. La liqueur noire est traitée pour récupérer les produits chimiques et le reste est utilisé comme combustible pour générer de la vapeur et de l'électricité. Dans ce type de procédé, la consommation électrique est autosuffisante, elle assure même une partie de la consommation électrique des machines à papier, dans le cas d'une usine intégrée (60 à 65%)<sup>2</sup>.

### 1.2.2.2. Procédé Bisulfite (Acide)

Le procédé Bisulfite est utilisé uniquement pour les bois résineux. Il est à la base de la réaction sur la lignine de l'hydrogénosulfite de calcium, sodium, ammonium ou magnésium contenant de l'anhydride sulfureux libre. L'anhydride sulfureux est préparé par combustion à partir du soufre dans un excès d'air. Le bisulfite est directement obtenu par réaction de l'anhydride sulfureux. Ce procédé est rarement utilisé à cause de sa limitation aux essences de bois (utilisé uniquement pour les bois résineux), en France il y'a qu'une seule usine<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Mme Lestieux Secrétaire Energie récupération, Saillat, International Paper SA.

<sup>3</sup> Fiches sectorielles (fabrication de pâte chimique), EDF, février 2004.



Nom de la Technologie	Pâte Chimique	Source
Code TIMES	IPPCHPLP	
<u>Inputs</u>	<u>Ratio</u>	-
Bois Energie Calorifique Electricité		CEREN, 2003 CEREN, 2003
<u>Outputs</u>		
Pâte à Papier	1000 kg	
Durée de vie	30	
C Investissement	1560 €t	Stora Enzo
Coûts fixes	15 €t	Voith
Coûts Variables	10 €t	Voith
Rendement	0,5	Technique de l'ingénieur

Tableau 6 : Description du procédé Chimique

### 1.2.3. La machine à Papier

La machine à papier va servir, à partir d'une matière première (pâte) préparée à cet effet, à fabriquer en continu une feuille de papier ou de carton, d'une largeur donnée et correspondant à des caractéristiques bien définies (grammage, épaisseur, propriétés physiques et optiques données).

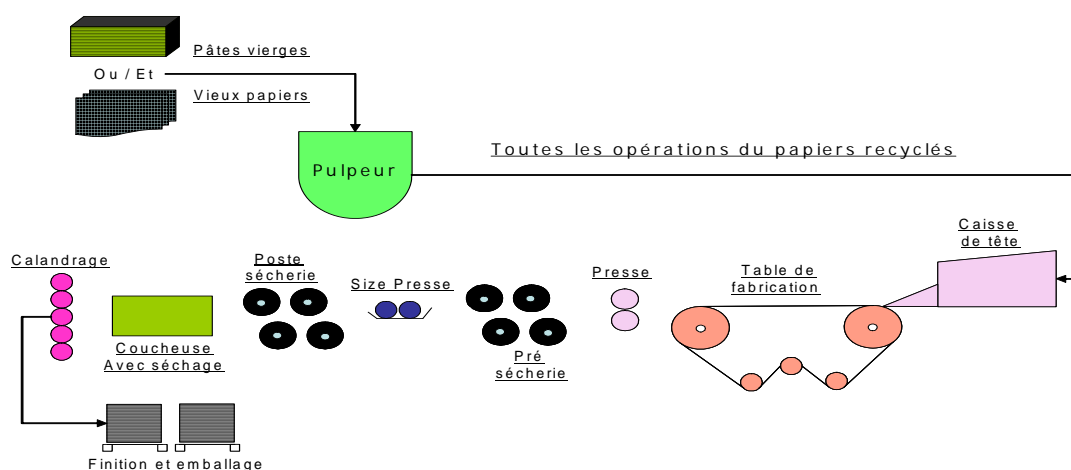


Figure 3: Procédé de fabrication, Machine à Papier

La machine à papier est composée de trois parties principales :

- La partie humide, constituée de la caisse de tête et de la table de fabrication. C'est dans cette partie que la feuille est formée puis égouttée, d'abord par gravité puis par dépression.
- La section de presse, où la feuille va être essorée le plus possible, par voie mécanique.
- La sécherie, où l'eau restante est éliminée par évaporation.

<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Pâte →</p> <p>Energie Calorifique →</p> <p>Electricité →</p> <p>Charges et additifs →</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; background-color: #ffffcc; text-align: center;"> <p><b>Procédé papier X</b> (Ex. Papier graphique)</p> <p><u>Données Techniques:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Capacité</li> <li>•Durée de vie</li> <li>•Rendement</li> <li>•Disponibilité</li> </ul> <p><u>Données économiques:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Coût d'investissement</li> <li>•Coûts fixes</li> <li>•Coûts variables</li> </ul> </div> <div style="text-align: center;"> <p>→</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #e0ffff;"> <p>Papier X (Ex. Papier graphique)</p> </div> </div> </div>		
Nom de la Technologie	Papier	Source
Code TIMES	IPPXXX	
<u>Inputs</u>	<u>Ratio</u>	-
Pâte à Papier	800 kg	
Kaolin	50 kg	
Gyps	220 kg	
Charges et matières fibreuses	200 kg	
<u>Outputs</u>		
Papier	1000 kg	
Coûts fixes	5% d'investissement	Estimation
Coûts Variables	2% d'investissement	Estimation
Durée de vie	30	
Rendement	0,9	Technique de l'ingénieur
<b>Consommations énergétiques et investissement par type de papier</b>		
<b><i>Papier Graphique</i></b>	PPRGRP	
Energie Calorifique		CEREN, 2003
Electricité		CEREN, 2003
Coût d'investissement	1097 €/t	Voith
<b><i>Papier Ondulé</i></b>	PPRCOR	
Energie Calorifique		CEREN, 2003
Electricité		CEREN, 2003
Coût d'investissement	500 €/t	Adolf Jass
<b><i>Papier Emballage</i></b>	PPRPCK	
Energie Calorifique		CEREN, 2003
Electricité		CEREN, 2003
Coût d'investissement	825 €/t	Obbola
<b><i>Papiers Spéciaux</i></b>	PPRSPC	
Energie Calorifique		CEREN, 2003
Electricité		CEREN, 2003
Coût d'investissement	875 €/t	Unicell
<b><i>Papier Carton</i></b>	PPRBRD	
Energie Calorifique		CEREN, 2003
Electricité		CEREN, 2003
Coût d'investissement	1308 €/t	Stora Enzo
<b><i>Papier pour carton ondulé</i></b>	PPRCRB	

Energie Calorifique		CEREN, 2003
Electricité		CEREN, 2003
Coût d'investissement	230 €/t	Voith
<i>Papier domestique et sanitaire</i>	<i>PPRDSN</i>	
Energie Calorifique		CEREN, 2003
Electricité		CEREN, 2003
Coût d'investissement	1260 €/t	Voith

Tableau 7 : Description des différents types de machine à papier

### 1.3. Le Système Energétique de Référence (RES)

Dans le cas de l'industrie du papier, le système énergétique de référence décrit les différentes étapes associées à ce secteur (production thermique, production de la pâte, production du papier) afin de satisfaire ainsi un service de demande finale. Globalement, l'étude se base sur le système énergétique de référence (RES) ci-dessous (Figure 4). Le système énergétique de référence est adapté de façon à donner au secteur du papier une représentation claire et cohérente avec l'interaction de plusieurs paramètres techniques et économiques.

Le choix du RES est caractérisé par le niveau de disponibilité de la base de données et les objectifs ciblés. Cependant, afin de permettre le calibrage du modèle et l'arbitrage entre le choix des technologies par type de combustible<sup>4</sup>, il est nécessaire de connaître l'état du parc de production (type d'installation, consommation, capacité, durée de vie,...etc) et la répartition énergétique par type de combustible. La section qui suit met en exergue l'ensemble de ces paramètres.

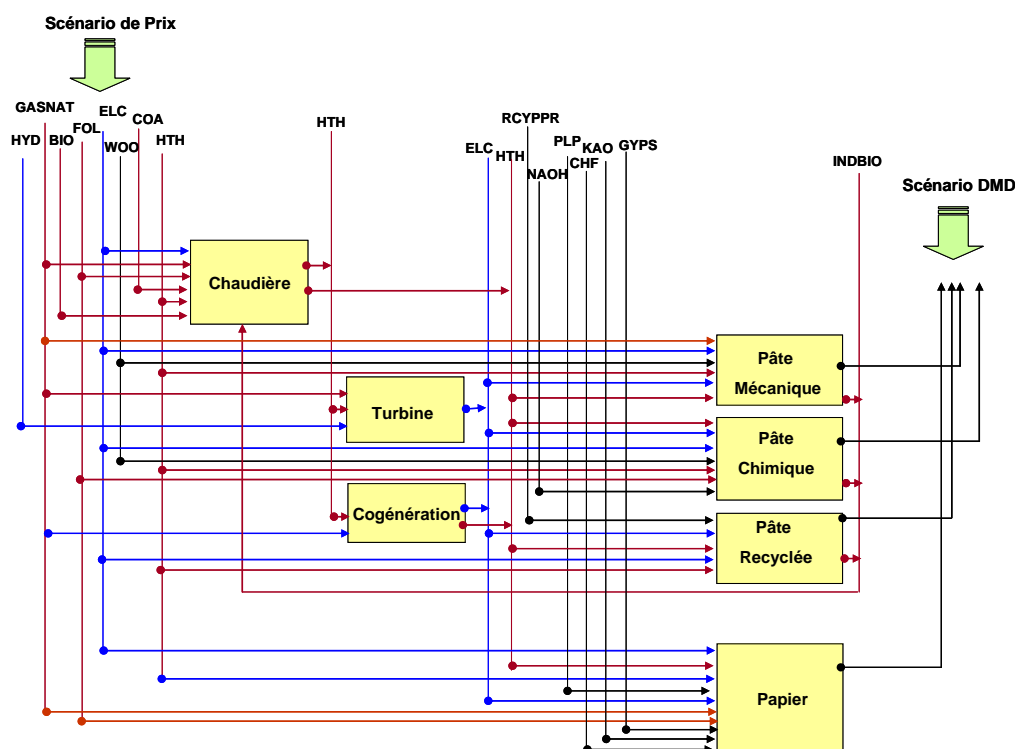


Figure 4 : Le système énergétique de référence de l'industrie du papier

<sup>4</sup> TIMES est un modèle orienté par la demande, le choix des technologies alternatives dépend fortement du prix de l'énergie utilisée et de la contrainte environnementale associée.

Néanmoins, afin d'assurer plus de cohérence en terme de diversité entre les différents type de papier, un modèle pédagogique plus abouti a été établi pour la France (voir Figure 5). La seule contrainte qui s'oppose à ce système énergétique de référence, est la connaissance de la part de chaque type de pâte dans chaque type de papier. En effet, la production de chaque type de papier nécessite une composition variable de type de pâte (exemple. par l'effet de ses fibres longues et résistantes, la pâte chimique est fortement présente dans la composition de papier à haute qualité). Pour contourner ce problème et remédier aux écarts qui peuvent être constatés, on a essayé de construire une centrale à pâte (boîte rose dans le schéma) dans laquelle la demande exogène de la pâte à papier a été endogénéisée. Cela a permis d'estimer l'évolution de chaque type de pâte sans que celle-ci ne soit associée à l'évolution de tel ou tel type de papier et ainsi la cohérence est assurée [Djemaa, 2007, 2008].

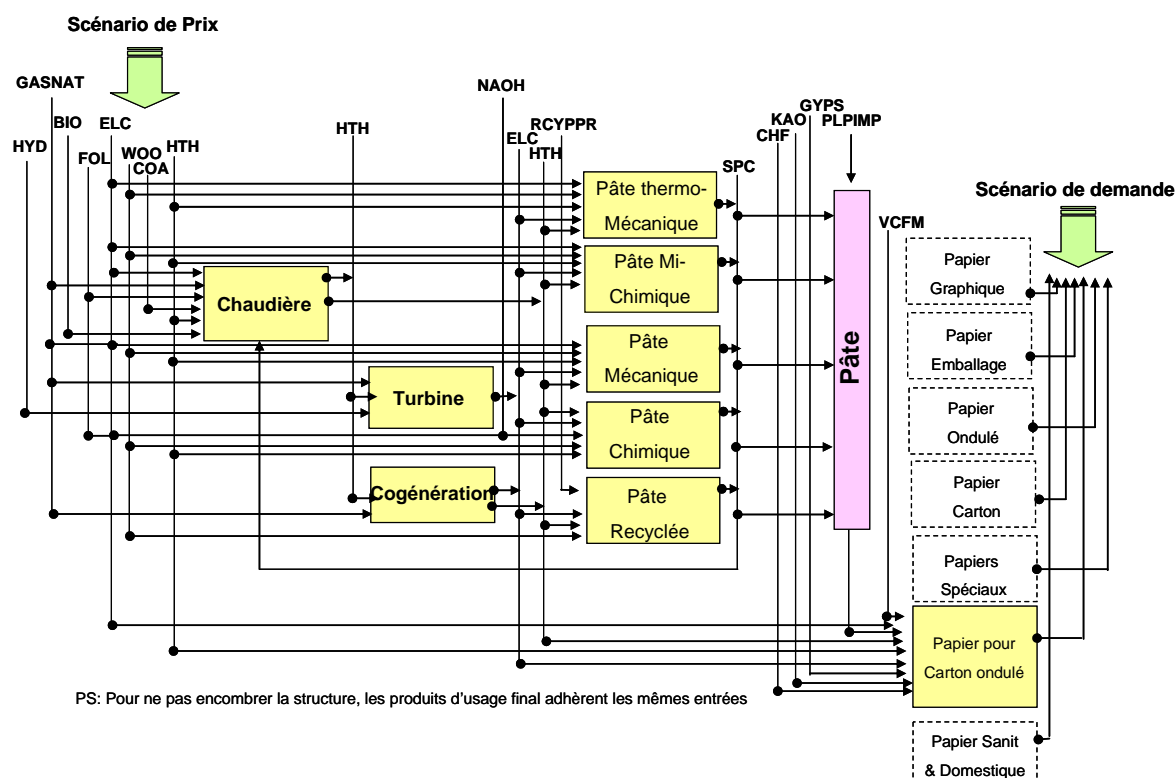


Figure 5: Le système énergétique de référence pédagogique pour l'industrie du papier en France<sup>5</sup>

## 2. Les données statistiques utilisées comme entrées du modèle

### 2.1. Les nouvelles technologies

L'ensemble des efforts de réduction des consommations énergétiques peut être réalisé en améliorant les installations de production d'énergie. Le passage au gaz permet d'augmenter les rendements de production de vapeur par rapport au fioul et au charbon. En effet, l'utilisation du gaz naturel est très répandue dans l'industrie papetière. Il représente 77%<sup>6</sup> de l'ensemble des combustibles, donc le passage au gaz est largement engagé.

<sup>5</sup> Pour ne pas encombrer la structure, les produits d'usage final acceptent les mêmes entrées.

<sup>6</sup> Profil énergétique CEREN, 2003

L'utilisation de la biomasse<sup>7</sup> pour la production de vapeur par la combustion des écorces, déchets de bois et boues des stations d'épuration, reste aussi une des voies de réduction des consommations énergétiques. Ces installations sont d'ores et déjà existantes. En effet, beaucoup d'efforts ont été réalisés au niveau de l'industrie pour ainsi permettre une consommation moindre et un meilleur rendement des technologies de production d'énergie.

A ce stade, la maîtrise de la demande d'énergie dans l'industrie est orientée vers une consommation moindre au niveau des procédés de fabrication et une gestion optimale de l'ensemble des installations. Dans la partie qui suit on essaie d'évoquer l'ensemble des innovations réalisées, du moins les plus importantes au niveau des technologies de production, dans le but de réaliser des réductions de consommations énergétiques considérables.

Nous allons caractériser 15 technologies (10 pour le papier et 5 pour la pâte à papier) avec une brève description sur les efforts de réduction des consommations énergétiques. Ces technologies ont atteint un stade de progrès plus au moins avancé et d'autres en sont au stade de développement. Les efforts de réduction des consommations énergétiques concernent les consommations en énergie calorifique et électrique. Le séchage comporte la part la plus importante des consommations énergétiques notamment l'énergie calorifique dans la machine à papier. L'ensemble de ces besoins de consommation en énergie peut être réduit par les efforts d'innovation réalisés dans les presses et les sécheries.

Les technologies répertoriées concernent les machines à papier comportant l'un des éléments suivants : une formation sèche de la feuille (Dry-Sheet-Forming), presse à séchage (Press Drying), ceinture de séchage à condensation (condebelt), séchage à impulsion (Impulse dryer), séchage avec application d'air (air impingement drying), séchage avec application de vapeur (steam impingement drying), séchage sans air (Airless drying), amélioration de la section de presse, optimisation de sécherie, fermeture des hottes.

Les technologies concernant la pâte à papier sont : les technologies biopulping, le procédé RTS et thermopulp et le procédé avec optimisation des usages énergétique pour la production de la pâte chimique.

## **2.1.1. Fabrication du papier**

### **2.1.1.1. Formation sèche de la feuille (Dry Sheet Forming)**

L'idée de cette technologie est la fabrication du papier sans addition d'eau. Le principe est de trouver une bonne méthode pour disperser les fibres sèches en feuilles plates. On les classe en deux techniques : technique de cardage (carding technique) et technique d'étalement à sec (air laying technique). Dans la technique de cardage, les fibres sont dispersées par voie mécanique. Dans la technique d'étalement à sec, les fibres sont suspendues en l'air et le papier se forme à la base de cette suspension. La liaison entre les fibres est obtenue en ajoutant des résines aux fibres ou en pulvérisant le latex de polymère sur la toile formée. Dans le premier cas la haute pression et la chaleur sont appliqués pour polymériser les résines, dans le second cas, la toile est séchée dans une chambre à air chaud. Cette technique est utilisée pour la production des papiers spéciaux, sanitaires et domestiques [Jaccard, 2004], pour papiers ondulés moyens, papiers cartons et filtres industriels [Attwood, 1996]. Un procédé

---

<sup>7</sup> Dans le cadre de la programmation pluriannuelle des investissements (PPI), un appel d'offre à été lancé en 2004 par le gouvernement pour des installations de production de vapeur et d'électricité à partir de la biomasse. Cinq projets impliquant des sites papetiers ont été retenus pour un total de 78MW électriques.

commercialisé utilise environ 2,085 MWh/t de produit [Attwood, 1996]. La consommation spécifique en électricité pour maintenir le débit d'air et faire fonctionner les équipements est de 1,5MWh/t de produit [Attwood, 1996]. Cette consommation peut augmenter de 0,16 à 0,278 MWh/t de papier si on passe la feuille de papier à travers une presse de réchauffage électrique, ainsi les consommations spécifiques en chaleur sont réduites de 100% (consommation 100% électricité). Les réductions des consommations énergétiques obtenues par cette technique sont comprises entre 50% et 100% pour l'énergie calorifique par tonne de papier et augmentent de 150% à 500% par tonne de papier pour l'énergie électrique [de Beer, 2000].

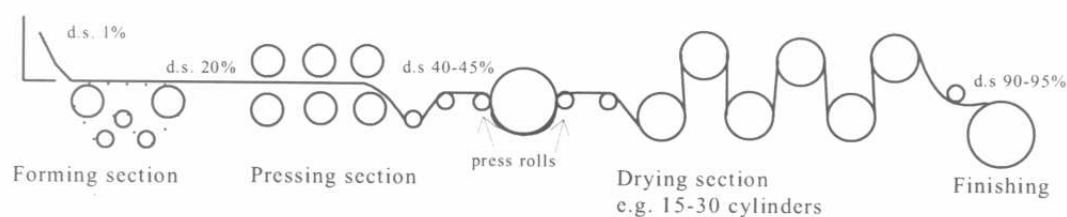
Nom de la technologie	<b><u>Formation sèche de la feuille</u></b>
Code source TIMES	IPDSFPRO
Fonction	Séchage
Energie électrique	+150 à +500%
Energie thermique	-75% (-50 à -100%)
Catégorie	Nouvelle technologie
Implémentation	2020 (Hypothèse)
Pénétration courante	0%
Pénétration maximale	100% (Hypothèse)
Coûts d'investissement supplémentaires	€/MWh
Coûts opératoires et de maintenance supplémentaires	€/MWh/an
Durée de vie économique	20

Source : J. de Beer, ICARUS-4, M.K. Jaccard

**Tableau 8 : Description du procédé formation sèche de la feuille**

#### **2.1.1.2. Presse à Séchage (Press Drying)**

La feuille est pressée entre deux surfaces chaudes (ex. deux cylindres). Dans l'ensemble des configurations de machine à papier, la presse à sécher se situe entre la section des presses et le séchage, ce qui permet une réduction significative du nombre de cylindres dans la section de séchage. Dans ce cas de figure, il n'y a aucune restriction dans le type de papier à produire et la qualité du papier est ainsi améliorée. Ce procédé [Back, 1991 ; Gunderson, 1991] est en phase de recherche et aucun prototype n'est à ce jour commercialisé. Les réductions des consommations énergétiques obtenues par cette technique sont comprises entre 5% et 30% pour l'énergie calorifique par tonne de papier et de 5% par tonne de papier pour l'énergie électrique [de Beer, 2000]. Les investissements directs relatifs à cette technique sont inférieurs à un système conventionnel et les coûts de maintenance sont ainsi réduits par la réduction du nombre de cylindres [de Beer, 2000]. Cette nouvelle technologie affecte la nature et la qualité du papier obtenu.



Source: J., de Beer, 2000

**Figure 6 : schéma descriptif de la technologie presse à séchage**

Nom de la technologie	<u><b>Presse à séchage</b></u>
Code source TIMES	IPPDRPPRO
Fonction	Séchage
Energie électrique	-12,5% (-5 à -20%)
Energie thermique	-17,5% (-5 à -30%)
Catégorie	Nouvelle technologie
Implémentation	2005 (Hypothèse)
Pénétration courante	0%
Pénétration maximale	100% (Hypothèse)
Coûts d'investissement supplémentaires	0 €/MWh
Coûts opératoires et de maintenance supplémentaires	0 €/MWh/an
Durée de vie économique	20

Source : J., de Beer, ICARUS-4, M.K., Jaccard

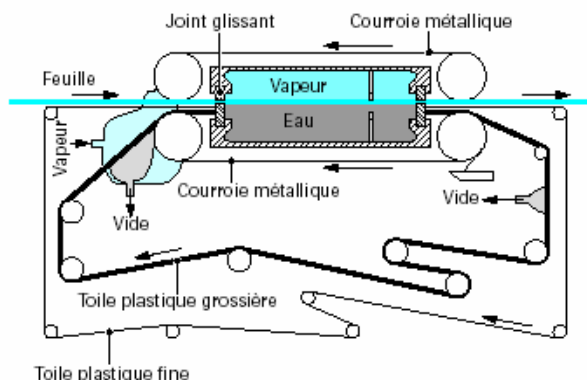
**Tableau 9 : Description de la technologie presse à séchage**

### 2.1.1.3. Ceinture de séchage à condensation (Condebelt)

Le premier système Condebelt a été installé en Finlande en 1996 et en Corée en 1999. Dans ce système, la feuille de papier humide est pressée entre, d'une part une courroie métallique lisse chauffée, et d'autre part une toile plastique fine, une toile plastique plus grossière et une deuxième courroie métallique refroidie. L'eau extraite de la feuille passe à travers la toile fine et se condense dans la toile grossière et sur la paroi froide de la deuxième courroie métallique. On est en présence d'un séchage sous pression (pressage et séchage simultanés, pendant un temps de contact relativement long).

Le taux d'évaporation annoncé est 5 à 10 fois supérieur à celui d'un cylindre sécheur normal (meilleur transfert de chaleur, épaisseur métallique plus faible, meilleur contact, absence d'air) [Lemaître, 2002]. Nous trouvons aussi d'autres sources donnant un taux d'évaporation de 5 à 15 fois supérieur [Lehtinen, 1995]. Il y a une densification importante de la feuille et une amélioration significative de certaines propriétés physiques. Pour les consommations énergétiques, il apparaît que les pertes de vapeur sont dues aux fuites à travers les joints de la chambre de séchage. Les économies de vapeur réalisées sont de l'ordre de 10 à 20% pour des grandes machines par rapport à un système normal [de Beer, 2000]. Plusieurs schémas sont proposés qui ajoutent des pompes à chaleur pour récupérer la chaleur de l'eau de

refroidissement et le condensat. Certaines expériences ont montré que, par l'application des pompes à chaleur, des économies en vapeur peuvent être réalisées, mais cela nécessite une consommation électrique supplémentaire pour faire tourner le compresseur de la pompe à chaleur, 208 à 278 KWh [de Beer, 2000]. Les coûts d'investissement sont comparables à un système conventionnel [Worrell, 1997].



Source: Metso Paper

**Figure 7 : schéma de la technologie ceinture de séchage à condensation**

Nom de la technologie	<u><b>Ceinture de séchage à condensation</b></u>
Code source TIMES	IPCBDPRO
Fonction	Séchage
Energie électrique	0%
Energie thermique	15% (-10% à -20)
Catégorie	Nouvelle technologie
Implémentation	1996
Pénétration courante	0%
Pénétration maximale	50%
Coûts d'investissement supplémentaires	0 €/MWh
Coûts opératoires et de maintenance supplémentaires	0 €/MWh/an
Durée de vie économique	20

Source : J., de Beer, ICARUS-4, M.K., Jaccard

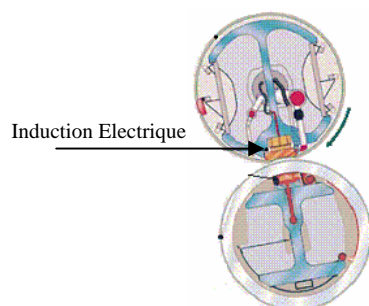
**Tableau 10 : Description de la technologie ceinture de séchage à condensation**

#### 2.1.1.4. Pressage à très haute température (Impulse Drying)

Cette technique consiste à mettre en pression le papier entre un cylindre rotatif et une ligne concave statique placée entre la section de pression et le séchage. La pâte à papier à la sortie de la section de presse passe à travers le cylindre rotatif en métal chauffé par induction électrique à 120°C [Jaccard, 2004] avec un temps de contact très court (15-100ms) [Alsema, 2001]. Le temps de pression est 10 fois inférieur à un système Condebelt [de Beer, 2000]. En effet, les caractéristiques de cette technique sont de combiner la pression avec la haute température avant la phase de séchage ce qui explique les temps de pression très élevés. Cette



combinaison permettra d'éliminer une bonne partie de l'eau de la pâte à papier. Les réductions des consommations énergétiques obtenues par cette technique sont comprises entre 35 % et 50% en énergie calorifique par tonne de papier et augmentent de 5 à 10% par tonne de papier pour l'énergie électrique [de Beer, 2000].



Source : Schéma Metso Paper

**Figure 8 : Technologie séchage à impulsion**

Nom de la technologie	<b><u>Séchage à impulsion</u></b>
Code source TIMES	IPIDRPPRO
Fonction	Séchage
Energie électrique	+7,5% (+5 à +10%)
Energie thermique	-42,5% (-35 à -50%)
Catégorie	Nouvelle technologie
Implémentation	2010 (Hypothèse)
Pénétration courante	0%
Pénétration maximale	100% (Hypothèse)
Coûts d'investissement supplémentaires	0 €/MWh
Coûts opératoires et de maintenance supplémentaires	0 €/MWh/an
Durée de vie économique	20

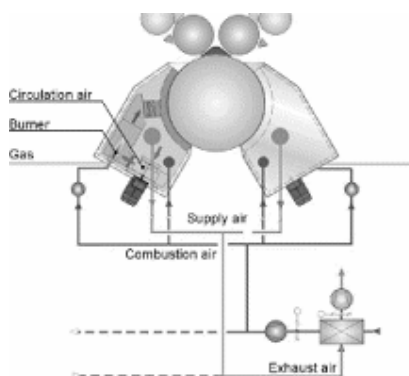
Source : J., de Beer, ICARUS-4, M.K., Jaccard

**Tableau 11 : Description de la technologie séchage à impulsion**

#### 2.1.1.5. Séchage avec application d'air (Air Impingement Drying)

Ce procédé implique de souffler de l'air chauffé à 300°C issu de brûleurs à gaz à une vitesse élevée sur la surface de la feuille. Bien que cette technique ait été développée dans le but d'obtenir une bonne siccité de la feuille, la demande d'énergie est inférieure à une unité de séchage conventionnelle. Cette consommation moindre en énergie peut être obtenue par l'optimisation de la température d'air de séchage, l'humidité des gaz d'échappement et la recirculation des flux d'air. Le premier procédé commercialisable pour le séchage du papier journal basé sur la technique de séchage par impact d'air (air impingement drying) de type OptiDry a été développé par Valmet-Tampella. Ce procédé peut être utilisé en combinaison avec une installation déjà existante. Les réductions des consommations énergétiques obtenues par cette technique sont comprises entre 10% et 40% en énergie calorifique par tonne de

papier et augmentent de 0% à 5% par tonne de papier pour l'énergie électrique [de Beer, 2000].



Source : Schéma Metso Paper

**Figure 9 : Technologie séchage avec application d'air**

Nom de la technologie	<b><u>Séchage avec application d'air</u></b>
Code source TIMES	IPAIIDPPRO
Fonction	Séchage
Energie électrique	+2,5% (0 à +5%)
Energie thermique	-25% (-10 à -40%)
Catégorie	Nouvelle technologie
Implémentation	2010 (Hypothèse)
Pénétration courante	0%
Pénétration maximale	100% (Hypothèse)
Coûts d'investissement supplémentaires	0 €/MWh
Coûts opératoires et de maintenance supplémentaires	0 €/MWh/an
Durée de vie économique	20

Source : J., de Beer, ICARUS-4, M.K., Jaccard

**Tableau 12 : Description de la technologie séchage avec application d'air**

#### 2.1.1.6. Séchage Airless (Airless Drying)

Le séchage « Airless » emploie la chaleur latente issue de l'humidité évaporée et exige un capot hermétique et bien isolé autour de la section de séchage de la machine de papier. Basé sur le même principe que le séchage conventionnel, la feuille de papier reste séchée par des cylindres de chauffage par vapeur, mais cette dernière est produite par la compression de la vapeur d'eau de la pression atmosphérique à 4 bar [de Beer, 2000]. Cette vapeur d'eau condensée peut fournir 60 à 80% de l'ensemble de l'énergie requise pour le séchage, réalisant ainsi une réduction de 70 à 90% des besoins en énergie thermique [Martin, 2000]. La récupération de la chaleur de vaporisation peut réduire le besoin en chaleur de l'ensemble de l'industrie papetière de 5 à 10%. La réduction des consommations énergétiques obtenues par cette technique est comprise entre– 70% et 90% en énergie calorifique par tonne de papier et

augmente de 5% à 20% par tonne de papier pour l'énergie électrique [de Beer, 2000].

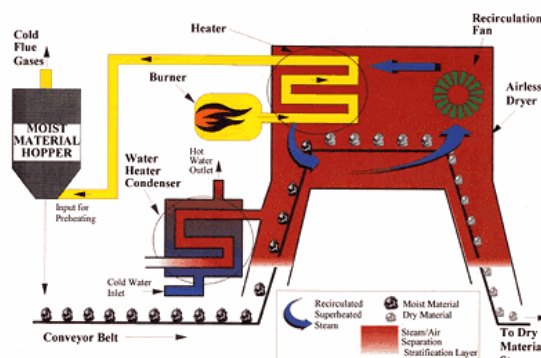


Figure 10 : Technologie de séchage sans air (Airless)

Nom de la technologie	<u><i>Airless Drying</i></u>
Code source TIMES	IPADRPRO
Fonction	Séchage
Energie électrique	+17,5% (+15 à +20%)
Energie thermique	-80% (-70 à -90%)
Catégorie	Nouvelle technologie
Implémentation	2011
Pénétration courante	0%
Pénétration maximale	100%
Coûts d'investissement supplémentaires	25 €/MWh
Coûts opératoires et de maintenance supplémentaires	1 €/MWh/an
Durée de vie économique	20

Source : J., de Beer, ICARUS-4, M.K., Jaccard

Tableau 13 : Description de la technologie séchage airless

#### 2.1.1.7. Séchage avec application de vapeur (Steam Impingement Drying)

Basé sur le même principe que le séchage par impact d'air (Air impingement Drying) en remplaçant l'air chaud par de la vapeur surchauffée. Dans de bonnes conditions, l'eau de la feuille évaporée est utilisée aussi comme de la vapeur. Ce procédé consiste en un cylindre sécheur, un compresseur, un module de réchauffage et un échangeur pour récupérer la chaleur résultante de l'excès de vapeur. La caractéristique principale de cette technologie par rapport à une technologie conventionnelle est la valorisation de la chaleur latente. Dans une technologie de séchage conventionnelle l'eau évaporée doit être enlevée de l'air de séchage en grande quantité, cet air humide contient une grande quantité d'énergie à basse température, la récupération de cette chaleur n'est pas toujours économique. Cependant, dans le cas du séchage par application de vapeur cette opportunité est rendue possible. Dans un cas d'étude

concernant le papier journal, il est estimé que 50% de l'énergie utilisée en vapeur peut être récupérée [Deventer, 1997]. Si on suppose qu'il nous faut 15 t de vapeur pour la fabrication de 1 t de papier, alors la demande en consommation spécifique est de 1,25 MWh/t de papier [de Beer, 2000]. La réduction en besoins de chaleur peut être assurée par la récupération de la chaleur latente de la vapeur de purge [de Beer, 2000]. La réduction des consommations énergétiques obtenues par cette technique est de 10 à 15% en énergie calorifique par tonne de papier et de 5 à 10% par tonne de papier pour l'énergie électrique [de Beer, 2000].

Nom de la technologie	<i><u>Séchage avec application de Vapeur</u></i>
Code source TIMES	IPSIDPPRO
Fonction	Séchage
Energie électrique	-7,5% (-5 à -10%)
Energie thermique	-12,5% (-10 à -15%)
Catégorie	Nouvelle technologie
Implémentation	2010
Pénétration courante	0%
Pénétration maximale	100%
Coûts d'investissement supplémentaires	0 €/MWh
Coûts opératoires et de maintenance supplémentaires	0 €/MWh/an
Durée de vie économique	20

Source : J., de Beer, ICARUS-4, M.K., Jaccard

**Tableau 14 : Description de la technologie séchage avec application de vapeur**

#### 2.1.1.8. Optimisation de sécherie

Des études sur la production du papier journal ont montré que des réductions de consommation de l'ordre de 20% peuvent être réalisées [Alsema, 2001]. Cela peut être fait avec un simple système de récupération de chaleur. D'autres installations ont montré que les réductions varient entre 8 et 42% [Martin et al. 2000]. L'étude réalisée par le Centre Technique du Papier rapporte que des réductions de consommation en énergie calorifique peuvent atteindre 10%.

Nom de la technologie	<i><u>Optimisation of drying</u></i>
Code source TIMES	IPOODPPRO
Fonction	Séchage
Energie électrique	0%
Energie thermique	-10%
Catégorie	Nouvelles technologie
Implémentation	2004
Pénétration courante	0%
Pénétration maximale	50%
Coûts d'investissement supp	0 €/MWh

Coûts O&M supplémentaires	0 €/MWh/an
Durée de vie économique	20

Source : ICARUS-4, CTP

**Tableau 15 : Description du procédé de production de papier avec optimisation de sécherie**

#### 2.1.1.9. Amélioration de section de presse

Pour la production de papier, un gain de 1% de siccité en sortie de presse correspond à un gain de 4% sur la consommation d'énergie en sécherie du fait de la réduction des quantités d'eau à évaporer. L'installation d'une presse supplémentaire ou de presses plus performantes permet en moyenne d'obtenir un gain de siccité de 3% soit une réduction des besoins en vapeur de 12%. Par contre, les équipements hydrauliques et l'entraînement des rouleaux des presses, engendrent une consommation supplémentaire d'électricité de 1%.

Nom de la technologie	<u>Amélioration de section de presse</u>
Code source TIMES	IPAPSPPRO
Fonction	Presse
Energie électrique	1%
Energie thermique	-12%
Catégorie	Nouvelles technologie
Implémentation	2004
Pénétration courante	0%
Pénétration maximale	20%
Coûts d'investissement supp	0 €/MWh
Coûts O&M supplémentaires	0 €/MWh/an
Durée de vie économique	20

Source : CTP

**Tableau 16 : Description du procédé de papier avec amélioration de la section de presse**

#### 2.1.1.10. Fermeture des Hottes

Pour la fermeture des hottes, le calcul sur la base des débits d'air et des températures permet d'aboutir à un potentiel de 15%.

Nom de la technologie	<u>Fermeture des hottes</u>
Code source TIMES	IPCOHPPPRO
Fonction	Séchage
Energie électrique	0%
Energie thermique	-15%
Catégorie	Nouvelles technologie
Implémentation	2004
Pénétration courante	0%

Pénétration maximale	80%
Coûts d'investissement supplémentaires	0 €/MWh
Coûts opératoires et de maintenance supplémentaires	0 €/MWh/an
Durée de vie économique	20

Source : CTP

**Tableau 17 : Description du procédé de papier avec la fermeture de hottes**

	Potentiel technique		Pénétration 2004	Pénétration supplémentaire / 2004	
	Thermique	Electrique		2010	2020
Amélioration Section de presses	12%	-1%	20%	5%	15%
Fermeture des Hottes	15%		80%	2%	5%
Optimisation de sécherie	10%		50%	5%	10%

**Tableau 18 : Potentiel d'économie d'énergie pour la production de papier**

#### 2.1.1.11. Autres

Certaines améliorations du procédé qui ne représentent pas un chiffrage individuel, sont présentées dans le tableau ci-dessous. L'ensemble des ces améliorations n'a pas été pris en compte dans le modèle pour deux raisons : soit elles ne sont pas bien spécifiées, soit les efforts d'amélioration ne sont pas assez importants.

	Potentiel technique		Pénétration 2004	Pénétration supplémentaire / 2004	
	Thermique	Electrique		2010	2020
Amélioration Rendement de Chaudières	2%		70%	5%	10%
Variateurs électroniques de Vitesse		10%	5%	2%	4%
Moteur électrique à haut rendement		1%	1%	2%	7%
Système de gestion de l'énergie	1%	2%	5%	5%	10%
Autres optimisations énergétiques	5%	5%	0%	20%	40%

**Tableau 19 : Améliorations diverses**

Les potentiels de réduction des consommations énergétiques de l'ordre de 2% ou inférieur et sans chiffrage individuel n'ont pas été pris en compte dans les technologies MDE (nouvelles technologies) du modèle.

### 2.1.2. Production de la pâte

Pour la fabrication des pâtes mécaniques, les perspectives d'évolution des technologies utilisées pour l'horizon 2030, sont liées à la technologie des raffineurs et/ou au prétraitement du bois avant action mécanique.

Certaines études ont développé des techniques, permettant un prétraitement du bois par des micro-organismes ou des enzymes avant action mécanique dans les raffineurs.

Selon le CTP, des technologies en cours de mise en œuvre industrielle sont basées sur un traitement à plus forte température et pression des copeaux de bois et un fonctionnement des raffineurs à plus haute vitesse, de l'ordre de 2300 tours/mn, au lieu de 1500 tr/mn dans les raffineurs classiques avec un temps de séjour réduit. Ces technologies dites de RTS (Retention-Time-Speed) sont une amélioration significative mais ne peuvent être mise en œuvre sur des systèmes existants.

Selon la même source, des améliorations pour l'intégration énergétique de site de pâte chimique (optimisation énergétique des différents ateliers) ont été engagées pour permettre une réduction dans les consommations énergétiques.

#### 2.1.2.1. Pâte mécanique biotechnologique (BIOPULPING)

Dans les bio-pâtes, le bois est traité avec des micro-organismes sélectionnés avant le passage par les raffineurs ou par les meules, dans le but d'obtenir une consommation énergétique moindre et une qualité meilleure de la pâte. Les micro-organismes sélectionnés se développent et attaquent la lignine du bois ce qui rend les fibres très faciles à séparer. Les économies d'énergies réalisées dépendent des caractéristiques des micro-organismes choisis et de la qualité du bois. Les réductions en consommation électrique sont de l'ordre de 20 à 40% [Kallioinen & Al, 2003] après deux semaines de traitement et plus de 47% après 4 semaines de traitement [Leathem et al. , 1990 ; Akhtar et al. , 1992; 1998].

L'ensemble des résultats de cette partie sont obtenus avec le micro-organisme « *Ceriporiopsis Subvermispora* ». Cependant, d'autres micro-organismes sont à l'étude par exemple le « *Phelbia subserialis* » avec des propriétés bien supérieures que le *Ceriporiopsis Subvermispora*. La première réalisation à grand échelle de production de 40 t de chipes de bois a été réalisé à Madison, USA [Scott et al., 1998]. La difficulté associée à cette technique est le contrôle des conditions optimales pour assurer une bonne évolution des micro-organismes à l'intérieur des silos. Cette difficulté s'explique par la taille et la formation des subzones hétérogènes en température, moisissures et répartition d'oxygène.

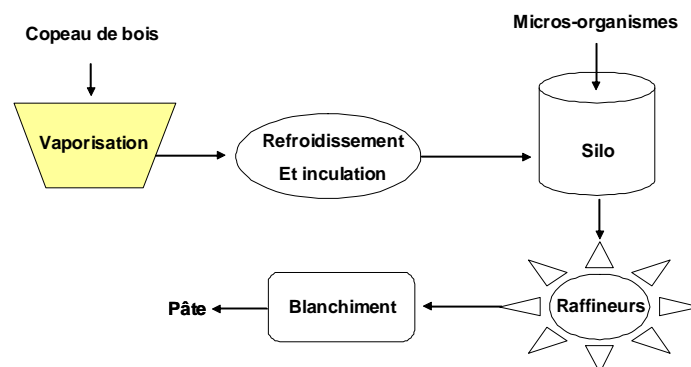


Figure 11 : Schéma sommaire du procédé biopulping

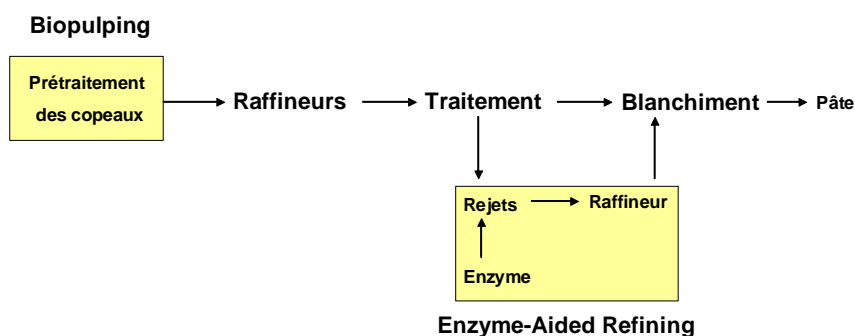
Nom de la technologie	<b><u>Biopulping</u></b>
Code source TIMES	IPBIOPLPRO
Fonction	Pâte
Energie électrique	+13 to +23%
Energie thermique	-15%
Catégorie	Nouvelle technologie
Implémentation	2010
Pénétration courante	15%
Pénétration maximale	50%
Coûts d'investissement supplémentaires	14825 €/t
Coûts opératoires et de maintenance supplémentaires	10 €/t
Durée de vie économique	35

Source : VTT

**Tableau 20 : Description de la technologie biopulping**

#### 2.1.2.2. Traitement à Enzyme (ENZYME-AIDED REFINING)

En addition aux micro-organismes, les enzymes peuvent être aussi utilisés pour les modifications des caractéristiques du bois avant l'opération mécanique. En outre cette technique est essentiellement utilisée pour améliorer les caractéristiques de la pâte ou pour agir sur les rejets avant les raffineurs.



**Figure 12 : Schéma sommaire de la technologie à Enzymes [Kallionen & Al., 2003]**

Nom de la technologie	<b><u>Enzym aided refiner</u></b>
Code source TIMES	IPENZPLPRO
Fonction	Pâte
Energie électrique	100Kwh/t
Energie thermique	%
Catégorie	Nouvelle technologie
Implémentation	2005
Pénétration courante	5%



Pénétration maximale	70%
Coûts d'investissement supplémentaires	500 €/t
Coûts opératoires et de maintenance supplémentaires	932 000 €/an
Durée de vie économique	30

Source : VTT

**Tableau 21 : Description de la technologie à Enzymes**

#### 2.1.2.3. Pâte mécanique TMP (RTS et Thermopulp)

Ces deux nouveaux procédés de pâte thermomécanique permettent une réduction des consommations électriques respectivement de 15%<sup>8</sup> et de 10 à 20% par rapport à un procédé thermomécanique normal [SEPA 4712-4, 1997 ; Twin, 2006, Martin et al., 2000]. Les données économiques sont quasi inexistantes. Pour cela on essaye de majorer les coûts d'investissement de 10 % par rapport aux coûts d'investissements d'une technologie thermomécanique conventionnelle [Martin et al., 2000 ; Jackson, 1996]. Pour ce qui est des coûts fixes et coûts variables, ils sont considérés inchangés.

Nom de la technologie	<u>RTS Process</u>	<u>Thermopulp Process</u>
Code source TIMES	IPERTSPLPRO	IPETHPPLPRO
Fonction	Pâte	Pâte
Energie électrique	-10 %	-15%
Energie thermique	%	%
Catégorie	Nouvelle technologie	Nouvelle technologie
Implémentation	2005	2005
Pénétration courante	5%	- %
Pénétration maximale	20%	- %
C d'Inv Supplémentaires	€/t	€/t
C Opér & Maint Supplimen	€/an	€/an
Durée de vie économique	30	30

Source : VTT

**Tableau 22 : Description de la technologie RTS**

#### 2.1.2.4. Optimisation des pâtes chimiques

Pour les pâtes chimiques il a été estimé que l'optimisation des procédés et de l'intégration énergétique, incluant le recours accru à la biomasse, permettrait de réduire les consommations de combustibles fossiles de 5 à 10% pour les horizon 2010 et 2020, de stabiliser la consommation d'électricité et d'augmenter les autoproductions d'électricité de 10 à 20%

Afin de ne pas trop contraindre le modèle, les taux de pénétration de chaque technologie ne sont pas inclus : c'est au modèle de le choisir librement au moindre coût.

<sup>8</sup> 10% pour le CTP

Nom de la technologie	<i><u>Optimisation de la pâte chimique</u></i>
Code source TIMES	IPCHPLPOPRO
Fonction	Pâte
Energie électrique	0%
Energie thermique	-5 to -10%
Catégorie	Nouvelle technologie
Implémentation	2010
Pénétration courante	%
Pénétration maximale	50% (hypothèse)
C d'Inv Supplémentaires	€/t
C Opér & Maint Supplimen	€/an
Durée de vie économique	30

Source : VTT

**Tableau 23 : Description du procédé de la pâte avec optimisation de la pâte chimique**

## 2.2. Les données de production

Dans le cadre des consommations énergétiques, la France est traitée dans cette étude en tant que pays de référence. Les données de production sont largement connues pour la plupart des pays européens.

Pour la France les données de production proviennent du SESSI, de l'INSEE, ou des organismes professionnels.

Pour le reste des pays européens les données sont fournis par : Eurostat, European Iron and steel work ou directement sur les sites des organismes professionnels dans le cas de l'Europe de l'est.

### 2.2.1. La France

Les données répertoriées ci-dessous concernent les secteurs : Pâte à papier (211A), Papier et carton (211C), Carton ondulé (212A), Cartonnages (212B), Emballages, articles sanitaires, papiers peints (212(C-E-J-L)), Articles de papeterie (212G).

Produits	Production
Papier graphique	4,314
Papier emballage	0,372
Papier ondulé	3,150
Papier carton	0,850
Papiers spéciaux	0,940
Papier pour carton ondulé	2,520
Papier sanitaire et domestique	0,818
Pâte chimique	1,699
Pâte mécanique	0,114
Pâte thermomécanique	0,445
Pâte mi-chimique	0,077
Papier recyclé	5,572

**Tableau 24 : Productions de l'industrie papetière en Mt, année 2001<sup>9</sup>**

<sup>9</sup> **Papier à usages graphiques** : papiers pour impression, papiers pour écriture ; **Papiers pour emballage** : papiers pour

### 2.2.2. Le reste de l'Europe

Les données de production ont été recueillies sur le site de la confédération des industries européennes du papier (CEPI)<sup>10</sup>. Elles ont été complétées par les organismes professionnels et le CEREN via les statistiques de *pulp & paper international* (PPI)<sup>11</sup>. Toutes les données sont relatives à l'année 2000.

Pays	Produits	NACE	Production
Autriche	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,600
	Pâtes chimiques	21.11.1	1,114
	Papier recyclé	21.11	2,679
	Papier journal	21.12.11	0,384
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	2,186
	Papier kraft, cartons	21.12.2	1,638
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,184
	Papier	21	4,392
Belgique	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,314
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,584
	Papier recyclé	21.11	0,829
	Papier journal	21.12.11	0,124
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	1,097
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,349
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,157
	Papier	21	1,727
Suisse	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,000
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,000
	Papier recyclé	21.11	0,000
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,000
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,000
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,000
	Papier	21	0,000
Chypre	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,000
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,000
	Papier recyclé	21.11	0,000
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,000
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,000
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,000
	Papier	21	0,000
Répub-Tchèque	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,068
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,569
	Papier recyclé	21.11	0,558
	Papier journal	21.12.11	0,119

carton ondulé, papiers d'emballage et de conditionnement autres que le carton ondulé ; **Cartons** : cartons pour bureau, conditionnement dont carton ondulé, cartons pour usages industriels ; **Papiers sanitaires et domestiques** : produits en formats ou rouleaux de papier, produits à base de pâte défibrée (fluff) ; **Papiers et cartons spéciaux** : papiers pour usages électriques, papiers pour filtres, papiers pour supports, papiers à cigarettes, papiers fiduciaires.

<sup>10</sup> [www.cepi.org](http://www.cepi.org). La valeur 0 est la valeur intégrée dans le modèle, elle exprime le manque de la donnée.

<sup>11</sup> [www.ppi-mfi.com](http://www.ppi-mfi.com)

	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,133
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,461
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,283
	Papier	21	0,996
Allemagne	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	1,342
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,873
	Papier recyclé	21.11	13,091
	Papier journal	21.12.11	1,806
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	7,319
	Papier kraft, cartons	21.12.2	6,770
	Papiers spéciaux	21.12.3	2,287
	Papier	21	18,182
Danemark	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,100
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,200
	Papier recyclé	21.11	0,336
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,000
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,000
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,000
	Papier	21	0,600
Estonie	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,030
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,070
	Papier recyclé	21.11	0,112
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,000
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,000
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,000
	Papier	21	0,200

Espagne	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,114
	Pâtes chimiques	21.11.1	1,624
	Papier recyclé	21.11	2,477
	Papier journal	21.12.11	0,288
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	1,018
	Papier kraft, cartons	21.12.2	2,586
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,872
	Papier	21	4,764
Finlande	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	1,324
	Pâtes chimiques	21.11.1	2,459
	Papier recyclé	21.11	9,727
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,000
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,000
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,000
	Papier	21	13,510
Grèce	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,051
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,094
	Papier recyclé	21.11	0,075
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,000
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,000
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,000

	Papier	21	0,220
Hongrie	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,000
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,025
	Papier recyclé	21.11	0,228
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,209
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,261
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,036
	Papier	21	0,506

Irlande	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,000
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,000
	Papier recyclé	21.11	0,000
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,000
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,000
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,000
	Papier	21	0,000
Islande	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,000
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,000
	Papier recyclé	21.11	0,000
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,000
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,000
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,000
	Papier	21	0,000
Italie	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,354
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,246
	Papier recyclé	21.11	4,109
	Papier journal	21.12.11	0,174
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	2,882
	Papier kraft, cartons	21.12.2	4,478
	Papiers spéciaux	21.12.3	1,596
	Papier	21	9,130
Lituanie	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,106
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,197
	Papier recyclé	21.11	0,248
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,000
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,000
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,000
	Papier	21	0,550

Luxembourg	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,000
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,000
	Papier recyclé	21.11	0,000
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,000
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,000
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,000
	Papier	21	0,000

Lettonie	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,048
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,088
	Papier recyclé	21.11	0,064
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,000
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,000
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,000
	Papier	21	0,200
Malte	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,000
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,000
	Papier recyclé	21.11	0,000
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,000
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,000
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,000
	Papier	21	0,000
Pays-Bas	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,137
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,000
	Papier recyclé	21.11	2,133
	Papier journal	21.12.11	0,415
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,930
	Papier kraft, cartons	21.12.2	1,854
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,133
	Papier	21	3,332

Norvège	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,258
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,478
	Papier recyclé	21.11	1,564
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,000
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,000
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,000
	Papier	21	2,300
Pologne	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,090
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,810
	Papier recyclé	21.11	0,658
	Papier journal	21.12.11	0,211
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,317
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,936
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,471
	Papier	21	1,935
Portugal	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,000
	Pâtes chimiques	21.11.1	1,773
	Papier recyclé	21.11	0,581
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,701
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,515
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,074
	Papier	21	1,290
Roumanie	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,000
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,000
	Papier recyclé	21.11	0,000

	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,000
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,000
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,000
	Papier	21	0,000

Suède	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	1,247
	Pâtes chimiques	21.11.1	2,317
	Papier recyclé	21.11	7,236
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,000
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,000
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,000
	Papier	21	10,800
Slovénie	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,172
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,320
	Papier recyclé	21.11	0,328
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,000
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,000
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,000
	Papier	21	0,820
Slovaquie	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,105
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,321
	Papier recyclé	21.11	0,265
	Papier journal	21.12.11	0,000
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	0,276
	Papier kraft, cartons	21.12.2	0,237
	Papiers spéciaux	21.12.3	0,150
	Papier	21	0,663
Royaume-Uni	Pâtes mécaniques et mi-chimiques	21.11.14	0,517
	Pâtes chimiques	21.11.1	0,000
	Papier recyclé	21.11	3,168
	Papier journal	21.12.11	1,100
	Papier d'impression-écriture	21.12.14	1,747
	Papier kraft, cartons	21.12.2	2,552
	Papiers spéciaux	21.12.3	1,202
	Papier	21	6,601

Tableau 25 : Production de l'industrie papetière en Mt

## 2.3. Les consommations énergétiques

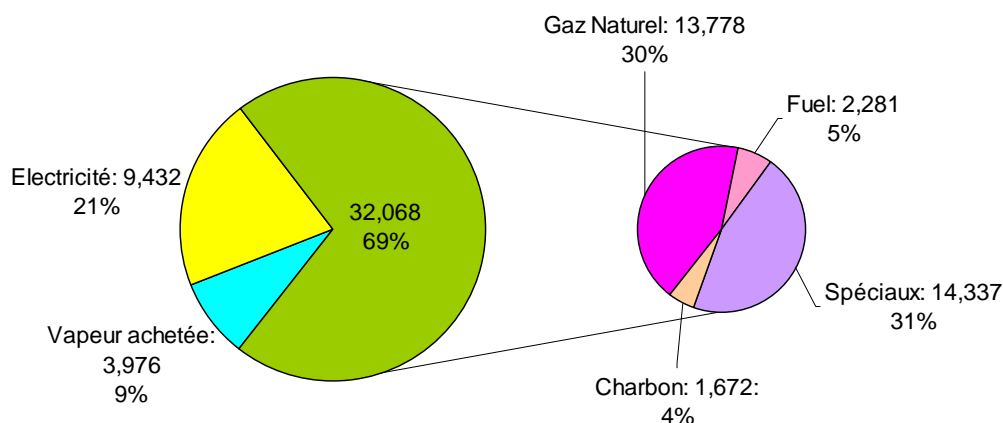
### 2.3.1. La France<sup>12</sup>

L'industrie papetière est classée parmi les industries énergivores avec un achat total de 45,476 TWh (hors GPL et FOD) en 2001 dont 32,450 TWh<sup>13</sup> pour les combustibles fossiles (soit 69%), 3,976 TWh pour l'achat de vapeur (soit 9%) et 9,432 TWh pour l'électricité achetée

<sup>12</sup> L'ensemble des statistiques relevées dans cette partie ont comme source le profil énergétique du secteur du papier et carton de CEREN, 2003.

<sup>13</sup> Compris les GPL et les FOD

(soit 21%). Parmi les combustibles fossiles, le gaz naturel représente 30% soit un total de 13,778 TWh, les spéciaux (biomasse + biomasse industrielle<sup>14</sup>) 31% (14,337 TWh), le fioul 5% (2,281 TWh) et le charbon 4% (1,672 TWh).



**Figure 13 : Consommation par type de combustible de l'industrie papetière (TWh)**

Les combustibles spéciaux sont principalement de la liqueur noire (9,939 TWh), des déchets de bois ou de papiers (3,159 TWh).

	Liqueur Noire	Déchets de bois ou de papiers	Autres déchets industriels	Autres combustibles spéciaux solides	Autres combustibles spéciaux liquides	Méthane	Total
Pâtes à papier							
Papier et carton							
Total							

Source : CEREN

**Tableau 26 : Répartition des spéciaux par énergie et par segment en TWh, 2001**

Les combustibles fossiles utilisés majoritairement sous chaudière (90%) servent à la production des fluides caloporteurs pour des usages divers au niveau du procédé industriel tel que les réactions chimiques, le chauffage des liquides, le séchage, le traitement thermique et la fusion. Les 10% restants sont exploités comme combustibles directs (hors chaudières). Le charbon, le gaz naturel, le fioul lourd et les combustibles spéciaux sont largement utilisés sous chaudière avec des parts respectives de 100%, 77%, 89% et 100%.

La consommation d'électricité s'élève à 11,448 TWh avec 9,432 TWh d'électricité achetée et 2,016 TWh autoproduits. La force motrice (défibreurs) est le principal usage de l'électricité avec 94% (10,743 TWh), le reste est utilisé pour l'éclairage et la production (chaudières

<sup>14</sup> Majoritairement de la liqueur noire



électriques) de vapeur.

### 2.3.2. Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières

Après répartition des consommations de combustibles sous chaudière, il apparaît que les combustibles spéciaux et le gaz naturel représentent la grande part des énergies consommées (50 et 37% du total des consommations sous chaudières et hors récupération). Le fioul et le charbon représentent respectivement 7 et 6%. Les rendements associés aux chaudières sont les rendements minimums relatifs au décret du 98-817 du 11-09-1998) (voir annexe).

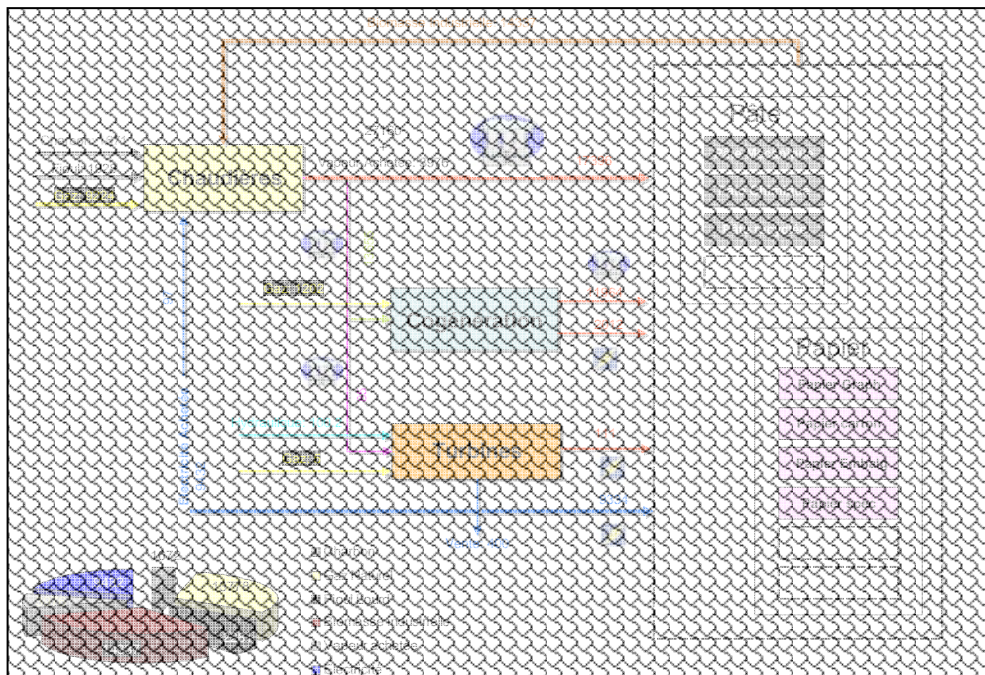


Figure 14 : Répartition des consommations énergétiques par opération (GWh)

Segment	Type	Nbre	Comb	Conso	P. Installée	Dispo	Rendement	Age
pâte à papier	à tubes d'eau							
	à tubes d'eau							
	de récupération							
Papier et Carton	à tubes d'eau							
	à tubes d'eau							
	de chauffage central							
	à vaporisation instantanée							
	à tubes de fumée							
	Total Gaz							
	à tubes d'eau							
	à tubes de fumée							
	électrique							
	à tubes d'eau							
	à tubes d'eau							
	à tubes de fumée							
Carton ondulé	Total mixte							
	de récupération							
	à tubes d'eau							
	de chauffage central							
	à tubes de fumée							
	Total Gaz							
	à tubes d'eau							
	à tubes de fumée							
	Total FOL							
	électrique							
	à tubes d'eau							
	à tubes de fumée							
Emballages, Articles sanitaires, papier peints	Total mixte							
	de récupération							
	à tubes d'eau							
	à tubes de fumée							
	de chauffage central							
	à vaporisation instantanée							
	Total Gaz							
	à tubes d'eau							
	à tubes de fumée							
	Total FOL							
	électrique							
	à tubes d'eau							

Source : CEREN

**Tableau 27 : Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières par segment industriel**

### 2.3.3. Consommation en GWh et puissance installée en MW des cogénérations et turbines

Les équipements de cogénération à vapeur (les turbines à vapeur avec soutirage et contrepression ou avec soutirage et condensation) consomment 14 858 GWh dont 52% dans la fabrication de papier et carton et 47% dans la fabrication de la pâte à papier. L'ensemble de ces installations ont un rendement moyen global de 95%.

Les installations de cogénération à gaz naturel ont un rendement moyen global (électrique + thermique) de 82%.

Par ailleurs, les autres équipements, essentiellement les turbines hydrauliques (90% de l'électricité produite), sont utilisés surtout dans l'industrie du papier et carton.

Segment	Type	Nbre	Combs	Conso	P. Installée	Elc. Prod	Chlr. Recup	C/F	Dispo	Rendement	Age
pâte à papier	Contrepression										
	soutirage et contrepression										
	Total										
Papier et Carton	Hydraulique										
	condensation										
	Contrepression										
	soutirage et condensation										
	soutirage et contrepression										
	Total										
	Gaz avec cd de recup simple										
	gaz cd de recup avec bruleur										
Carton ondulé	à contrepression										
	soutirage et contrepression										
	Total										
	Gaz avec cd de recup simple										
Articles sanitaires Emballages, papier peints	soutirage et condensation										
	Gas sans Récupération										

Source : CEREN

**Tableau 28 : Consommation en GWh et puissance installée en MW des installations de cogénération et turbines**

### 2.3.4. Le reste de l'Europe

L'ensemble des données recueillies se base sur l'étude réalisée par le CEREN qui consiste à donner un éclairage sur les consommations d'énergie dans 13 pays Européens pour le secteur industriel. A la base de ces consommations spécifiques moyennes on a pu élargir le périmètre à 29 pays.

Pays	Produits	Csgaz (kWh/t)	Cselc (kWh/t)	Cscomb (kWh/t)	Élec (GWh)	Comb (GWh)	gaz %	gaz (GWh)
<b>Allemagne</b>	pâtes mécaniques et mi-chimiques							
	pâtes chimiques							
	papier journal							
	papier d'impression-écriture							
	papier kraft, cartons							
	papiers spéciaux							
<b>Belgique</b>	pâtes mécaniques et mi-chimiques							
	pâtes chimiques							
	papier journal							
	papier d'impression-écriture							
	papier kraft, cartons							
	papiers spéciaux							
<b>Pays-Bas</b>	pâtes mécaniques et mi-chimiques							
	pâtes chimiques							
	papier journal							
	papier d'impression-écriture							
	papier kraft, cartons							
	papiers spéciaux							
<b>Espagne</b>	pâtes mécaniques et mi-chimiques							
	pâtes chimiques							
	papier journal							
	papier d'impression-écriture							
	papier kraft, cartons							
	papiers spéciaux							
<b>Italie</b>	pâtes mécaniques et mi-chimiques							
	pâtes chimiques							
	papier journal							
	papier d'impression-écriture							
	papier kraft, cartons							
	papiers spéciaux							
<b>Royaume-Uni</b>	pâtes mécaniques et mi-chimiques							
	pâtes chimiques							
	papier journal							
	papier d'impression-écriture							
	papier kraft, cartons							
	papiers spéciaux							

<b>Portugal</b>	pâtes mécaniques et mi-chimiques	
	pâtes chimiques	
	papier journal	
	papier d'impression-écriture	
	papier kraft, cartons	
	papiers spéciaux	
<b>Autriche</b>	pâtes mécaniques et mi-chimiques	
	pâtes chimiques	
	papier journal	
	papier d'impression-écriture	
	papier kraft, cartons	
	papiers spéciaux	
<b>Hongrie</b>	pâtes mécaniques et mi-chimiques	
	pâtes chimiques	
	papier journal	
	papier d'impression-écriture	
	papier kraft, cartons	
	papiers spéciaux	
<b>Pologne</b>	pâtes mécaniques et mi-chimiques	
	pâtes chimiques	
	papier journal	
	papier d'impression-écriture	
	papier kraft, cartons	
	papiers spéciaux	
<b>Slovaquie</b>	pâtes mécaniques et mi-chimiques	
	pâtes chimiques	
	papier journal	
	papier d'impression-écriture	
	papier kraft, cartons	
	papiers spéciaux	
<b>Répub. tchèque</b>	pâtes mécaniques et mi-chimiques	
	pâtes chimiques	
	papier journal	
	papier d'impression-écriture	
	papier kraft, cartons	
	papiers spéciaux	
<b>Total 9 Pays WE</b>	pâtes mécaniques et mi-chimiques	
	pâtes chimiques	
	papier journal	
	papier d'impression-écriture	
	papier kraft, cartons	
	papiers spéciaux	

Total 4 Pays EE	
--------------------	--

Tableau 29 : Consommation énergétique par pays de l'industrie papetière en GWh

## 2.4. Les installations de production de chaleur et d'électricité disponibles

Cette partie consiste à représenter l'ensemble des installations de production d'électricité et de chaleur disponibles pour le choix du modèle. Sont prises en compte les installations de cogénération avec une turbine à vapeur, turbine à gaz avec ou sans post-combustion, avec moteur thermique et les cycles combinés ; les chaudières à gaz, à charbon, à biomasse et à fioul, les turbines à biomasse, à fioul, à charbon et à gaz. Les installations de cogénération ont comme référence les études réalisées par EDF dans l'objectif d'établir un point sur les principales caractéristiques techniques, sur les coûts d'investissement et sur les coûts d'exploitation. Les chaudières et les turbines ont comme source « *Institut for Applied Ecology* » et « *the Austrian Energy Agency* ».

Description de la technologie	Durée de vie	Coûts fixes	Coûts variables	Investissements	Rendement	Disponibilité
Chaudière à charbon 01						
Chaudière à charbon 02						
Chaudière à charbon 03						
Chaudière à charbon 04						
Chaudière à gaz 01						
Chaudière à gaz 02						
Chaudière à gaz 03						
Chaudière à gaz 04						
Chaudière à gaz 05						
Chaudière à fuel 01						
Chaudière à fuel 02						
Chaudière à fuel 03						
Chaudière à fuel 04						
Chaudière à fuel 05						
Chaudière à Biomasse 01						
Chaudière à Biomasse 02						
Chaudière à Biomasse 03						
Chaudière à Biomasse 04						

Tableau 30 : Nouvelles chaudières installées

Description de la technologie	Durée de vie	Coûts fixes	Coûts variables	Investissements	Rendement	Disponibilité
Cycle combiné gaz						
Turbine à gaz						
Turbine à Charbon 01						
Turbine à Charbon 02						
Turbine à Charbon 03						
IGCC Charbon						
Turbine à Fioul						
Turbine à biomasse						
Turbine à biomasse						
IGCC Biomasse						
Hydraulique						

**Tableau 31 : Nouvelles Turbines installées**

Description de la technologie	Durée de Vie	Coûts fixes	Coûts Variables	Investissements	Rendement	Disponibilité	HTH/ELC
Cycle combiné condensation gaz 01							
Cycle combiné condensation gaz 02							
Cycle combiné condensation gaz 03							
Cycle combiné condensation gaz 04							
Cycle combiné condensation gaz 05							
Cycle combiné condensation gaz 06							
Cogénération à Biomasse							
Cycle combiné contrepression gaz 01							
Cycle combiné contrepression gaz 02							
Cogénération contrepression charbon							
Cogénération condensation biomasse							
Cogénération à gaz à combustion interne 01							
Cogénération à gaz à combustion interne 02							
Cogénération à gaz à combustion interne 03							
Cogénération à fioul à combustion interne 01							
Cogénération à fioul à combustion interne 02							
Cogénération à fioul à combustion interne 03							

**Tableau 32 : Nouvelles cogeneration installées**

	<b>TAV Fioul</b>	<b>TAV Charbon</b>	<b>TAC ss P.C</b>	<b>TAC av P.C</b>	<b>Moteur Fioul</b>	<b>Moteur Gaz</b>	<b>C.C Gas</b>
<b>Rendement therm (%)</b>	60	60	50	55	45	50	40
<b>Rendement elec (%)</b>	20	20	25	20	35	30	35
<b>Rendement Global (%)</b>	80	80	75	75	80	80	75
<b>Puiss. therm (KWth)</b>	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
<b>Puiss. Elec (KWe)</b>	1666	1666	2500	1818	3888	3000	4375
<b>Besn. Comb (GWh)</b>	73	73	87.6	79.6	97.3	87.6	109.5
<b>Coûts d'Inv (€/KWe)</b>	2084.3	2605.5	1216	1354.86	1042.2	1059.6	1059.6
<b>Coût d'expl K€/an</b>	766	698.3	1169	1005.7	1273.2	1262.8	1526.8

Source: ADEME

**Tableau 33 : Installations type de 5MWth**

## BIBLIOGRAPHIE

[Akhtar *et al.*, 1992]

Akhtar, M., Lentz, M.J., Blanchette, R.A. and Kirk, T.K., Corn steep liquor lowers the amount of inoculum for biopulping, Tappi J. 80:161–164, 1997.

[Alsema, 2001]

E. A. Alsema, Sector study for the Paper and Board industry and the graphical industry, Report prepared for the Utrecht Center for Energy research (UCE), Department of Science, Technology and Society, Utrecht University, The Netherlands, 2001.

[Attwood, 1996]

B.W. Attwood, personal communication, St. Annes Paper and paperboard development Ltd, UK, October 29<sup>th</sup> 1996.

[Back, 1991]

E.L Back, Tappi Journal, 1991, 74, 135.

[Ballard *et al.*, 1987]

D. Ballard, C ; Berger *et al.*, Modeling Energy/Technology in the Pulp and Paper Industry of Canada: The MARKAL Approach, les Cahiers du GERAD, Ecole des Hautes Etudes Commerciales, 1987.

[BREF, 2001]

Integrated Pollution and Control (IPPC), Reference document on best available techniques in the pulp and paper industry, European commission, 2001.



**[CEREN, 2003]**

CEREN (Centre d'Etude et de Recherche Economique sur l'Energie), Le Profil Energétique du Secteur du Papier et Carton, secteur E35, Enquête par Enquêteur 2001, Paris, 2003.

**[CEREN, 2003]**

Modèle de consommations d'énergie dans l'industrie en Europe, Etude Réalisée pour EDF, CEREN 2003.

**[COPACEL, 2004]**

Confédération Française de l'industrie des Papiers et Carton et Cellulose. Rapport Statistique Annuel, Paris, 2004.

**[de Beer, 2000]**

J. de Beer, Potential for Industrial Energy Efficiency Improvement in the Long Term, Eco-Efficiency in Industry and Science, Kluwer Academic publishers, London, 2000.

**[Deventer, 1997]**

Deventer, HC van, Feasibility of Energy Efficient Steam Drying of Paper and textile Including Process Integration, Applied Thermal Engineering, 1997.

**[Djemaa, 2007]**

Djemaa A., Hita A., Maizi N., Guerassimoff G., Modelling energy saving potential in industry, eceee, 2007.

**[Djemaa, 2008]**

Djemaa A., Hita A., Maizi N., Guerassimoff G., Modeling the response of industry to environmental constraint, article accepté pour l'ECEEE 2009.

**[Elaahi and Lowitt, 1988]**

A. Elaahi, H.E. Lowitt, The U.S Pulp and Paper Industry: An Energy prospective, U.S Department of Energy, Washington, 1988.

**[ETSU, 1984]**

Energy Technology support Unit, UK Department of Energy, Energy use and energy efficiency in the UK manufacturing Industry up to the year 2000, volume 2. Her Majesty's Stationary Office, London.

**[Giraldo and Hyman, 1994]**

L. Giraldo, B. Hyman, Energy Consumption patterns in Paper and paperboard Industry, Department of mechanical Engineering, Seattle, 1994.

**[Guillet, 2005]**

F. Guillet, Panorama de la Fabrication de Pâte et Papier et Pistes de Maîtrise de la Demande d'Energie, Centre Technique du Papier, 2005.

**[Jaccard and Willis, 1996]** M. Jaccard and Wills Entreprise Associates. Energy Conservation Potentiel in Six Canadian Industries, 1996.

**[Jaccard, 2004]**

M.K. Jaccard & Associates, Case Study on Fiscal Policy and Energy Efficiency, Economic Study, Appendix B: Energy Efficiency Opportunities, National Round Table on the Environment and the Economy, 2004.

**[Jackson, 1996]**

Jackson, M., et al., Thermopulp- a new energy efficient mechanical pulping process, SPCI, Stockholm, 1996.

**[Kallioinen et al., 2003]**

Kallioinen, A., Lehtilä, A. et al., Biotechnical methods for improvement of energy economy in mechanical pulping, VTT research Notes, 2003.

**[Kline, 1991]**

J.E. Kline, Paper and Paperboard: Manufacturing and Converting Fundamentals, Miller Freeman Publications, San Francisco, 1991.

**[Lehtinen, 1993]**

J. Lehtinen, Energy analysis and Measurements Carried out during the year 1992 in Connection with Condebelt Project of Valmet-Tampella, Finland, 1993.

**[Lehtinen, 1995]**

J. Lehtinen, Condebelt Drying: Quality results and Process development, paper technology, 1995.

**[Loulou et al., 2005]**

R. Loulou, U. Remne et al., Documentation for the TIMES Model, Part I, Energy Technology Systems Analysis Programme, 2005.

**[Mäkelä, 2000]**

Mäkelä, J., Development of an Energy System Model of the Nordic Electricity Production System, Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Engineering, Helsinki University OF Technology, Department of Engineering Physics and Mathematics, 2000.

**[Martin et al., 2000]**

N.Martin, N.Anglani et al., Opportunities to Improve Energy Efficiency and Reduce Greenhouse Gas Emissions in the U.S Pulp and Paper Industry, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.

**[Nilson et al., 1995]**

L. Nilson, E. Larson et al. Energy Efficiency and the pulp and paper industry, American council for an Energy Efficiency-Economy, Washington, 1995.

**[Petit Conil, 1999]**

M. Petit Conil, Procédé Papetier, Fabrication des Pâtes, techniques de l'ingénieur, Grenoble, 1999.

**[Polat and Mujumdar, 1995]**

O. Polat, A.S. Mujumdar et al., Journal of pulp and paper Science, 1994, J97.

**[Remne et al., 2001]**

Remne, U. et al., Advanced Decision Support for Energy and Environmental Planning, MESAP/TIMES, University of Stuttgart, Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy, Personal communication 2001.

**[Saltman, 1978]**

D. Saltman, Paper Basics: Forestry, Manufacture, Selection Purchasing, Mathematics and Metrics, Recycling, Van Nostrand Reinhold Company, San Francisco, 1978.

**[Scott *et al.*, 1998]**

Scott, G.M. and Swaney, R., New technology for papermaking: biopulping economics, Tappi J. 8:153–157, 1998.

**[SEPA 4712-4, 1997]**

SEPA-Report 4712-4, 1997, Energy conservation in the pulp and paper industry, Jaakko Pöyry Consulting AB, 1997.

**[SEPA 4713-2, 1997]**

Pöyry, J., Aspects on Energy and Environment Costs in Connection with Production of Kraft Pulp, Recycled Fibre and TMP. Consulting AB. 1997

**[SESSI, 2004]**

SESSI (Service des Statistiques Industrielles), L'industrie Française, Ministère de l'économie des Finances et de l'industrie, Paris, 2004-2005.

**[Smith, 1993]**

E. Smith Personal Communication, Parenco Newspaper, Renkum, 1995.

**[Sundqvist, 1994]**

H. Sundqvist, Air system for the future drying section, Valmet Paper Machine days, Jyväskylä, Finland, 1994.

**[Twin, 2006]**

Twin A., Energy Savings in Mechanical Pulping, Perlen Papier, Suisse, 2001.

**[Ybema *et al.*, 1995]**

J.R Ybema, P. Lako *et al.*, Prospects for Energy technologies in the Netherlands, Volume 2, Technology characterizations and technology results, 1995.

---

## ***AVERTISSEMENT***

**Pour des raisons de confidentialité et de droit de reproduction de données technico-économiques, EDF R&D a souhaité masquer certaines données dans la présentation des secteurs industriels, en particulier les données CEREN, ULCOS et interne EDF.**

---

---

## **ANNEXE II**

## **LA SIDERURGIE**

---

**TABLE DES MATIERES**

<b>1. DESCRIPTION DU SECTEUR.....</b>	<b>257</b>
1.1. LA SIDERURGIE EN FRANCE EN QUELQUES CHIFFRES .....	257
1.1.1. <i>La Production</i> .....	257
1.1.2. <i>Importations et exportations</i> .....	258
1.1.2.1. Importations.....	258
1.1.2.2. Exportations.....	259
1.2. LA SIDERURGIE EN EUROPE.....	260
1.3. DESCRIPTION DES FILIERES DE PRODUCTION D'ACIER .....	261
1.3.1. <i>La Filière Fonte</i> .....	262
1.3.1.1. Procédés de Fabrication existants .....	263
1.3.1.2. Nouvelles Technologies considérées .....	269
1.3.2. <i>La Filière Electrique</i> .....	274
1.3.2.1. Procédés de Fabrication existants .....	274
1.3.2.2. Nouvelles technologies considérées.....	276
1.3.3. <i>Les nouvelles Filières de production d'acier</i> .....	279
1.3.3.1. La Réduction Directe (DRI) .....	279
1.3.3.2. La Réduction Fusion (SR) .....	284
1.3.4. <i>Les Autres opérations de la Sidérurgie</i> .....	289
1.4. LE SYSTEME ÉNERGETIQUE DE REFERENCE (RES) .....	296
1.5. SOURCES ET DONNEES STATISTIQUE .....	297
1.5.1. <i>Les données de production cas de la France</i> .....	297
1.5.2. <i>Les données de production, cas de l'Europe</i> .....	298
1.5.3. <i>Les consommations énergétiques</i> .....	305
1.5.3.1. Consommation de Combustibles par usage final le cas de la France .....	305
1.5.4. <i>Consommation énergétique des chaudières</i> .....	306
1.5.5. <i>Consommation Energétique des Turbines</i> .....	307
1.5.6. <i>Consommation de Combustibles par usage final le cas de l'Europe</i> .....	308
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>310</b>

➤ **TABLEAUX**

Tableau 1 : Production française (1991-2005) en Kt .....	258
Tableau 2 : Importations françaises d'acier.....	258
Tableau 3 : Exportations françaises d'acier.....	259
Tableau 4 : Production européenne et mondiale (1995-2005).....	261
Tableau 5 : Description de la cokerie (données techniques et économiques) .....	264
Tableau 6 : Description de l'agglomération (données techniques et économiques).....	266
Tableau 7 : Description de l'agglomération (données techniques et économiques).....	266
Tableau 8 : Description d'un haut fourneau (données techniques et économiques).....	268
Tableau 9 : Description d'un convertisseur à oxygène (données techniques et économiques) .....	269
Tableau 10 : Description d'une cokerie (CDQ) (données techniques et économiques) .....	270
Tableau 11 : Description d'une cokerie (CDQ) (données techniques et économiques) .....	271
Tableau 12 : Description d'un haut fourneau avec injection direct du charbon (données techniques et économiques) .....	273
Tableau 13 : Description d'un haut fourneau avec séquestration et stockage de CO <sub>2</sub> (données techniques et économiques) .....	274
Tableau 14 : Description d'un four à arc (données techniques et économiques) .....	275
Tableau 15 : Description d'un four à arc Comelt (données techniques et économiques).....	277
Tableau 16 : Description d'un four à arc Contiar (données techniques et économiques).....	278

Tableau 17 : Description d'un procédé Midrex (données techniques et économiques) .....	281
Tableau 18 : Description d'un procédé HYLIII (données techniques et économiques) .....	282
Tableau 19 : Description d'un procédé H <sub>2</sub> avec réformage de la vapeur (données techniques et économiques) .....	283
Tableau 20 : Description d'un procédé H <sub>2</sub> avec électrolyse de l'eau (données techniques et économiques) .....	283
Tableau 21 : Description d'un procédé de réduction fusion Corex (données techniques et économiques) .....	285
Tableau 22 : Description d'un procédé de réduction fusion Hismelt (données techniques et économiques) .....	286
Tableau 23 : Description d'un procédé de réduction fusion CCF (données techniques et économiques) .....	287
Tableau 24 : Description du procédé Alcaline Electrolyse (données techniques et économiques) .....	288
Tableau 25 : Description du procédé Pyroelectrolyse (données techniques et économiques) .....	289
Tableau 26 : Description de la métallurgie secondaire (données techniques et économiques) .....	290
Tableau 27 : Description de la coulée continue (données techniques et économiques) .....	291
Tableau 28 : Description de la coulée de brames minces (données techniques et économiques) .....	292
Tableau 29 : Description de la coulée en bandes minces (données techniques et économiques) .....	293
Tableau 30: Description du laminage à chaud (données techniques et économiques) .....	294
Tableau 31 : Description du laminage à chaud à base du gaz naturel (données techniques et économiques) .....	295
Tableau 32 : Description du laminage à froid (données techniques et économiques) .....	295
Tableau 33 : production de la sidérurgie en Mt.....	297
Tableau 34 : Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières .....	306
Tableau 35 : Répartition des Mixtes.....	307
Tableau 36 : Consommation en GWh et puissance installée en MW des cogénérations et turbines.....	307
Tableau 37 : Répartition des fluides caloporteurs .....	307

### ➤ FIGURES

Figure 1 : production d'acier en kt .....	257
Figure 2 : Répartition des importations françaises par provenance.....	259
Figure 3 : Exportations françaises par produit et par destination .....	260
Figure 4 : Consommation apparente du marché français .....	260
Figure 5 : Les filières de production d'acier .....	262
Figure 6: Procédés de fabrication : la filière fonte .....	263
Figure 7 : Schéma descriptif d'une usine d'agglomération de minerai de fer.....	265
Figure 8 : Schéma descriptif d'un haut fourneau .....	267
Figure 9 : Schéma descriptif d'un convertisseur à oxygène .....	268
Figure 10 : Schéma descriptif d'une cokerie (CDQ).....	270
Figure 11 : Schéma descriptif d'une cokerie (CDQ).....	271
Figure 12: Schéma descriptif d'un haut fourneau avec séquestration et stockage de CO <sub>2</sub> (CCS) .....	273
Figure 13 : Schéma descriptif d'un four à arc .....	275
Figure 14 : Schéma descriptif d'un four à arc Comelt .....	276
Figure 15 : Diagramme sommaire de la production d'acier par la filière réduction directe.....	279
Figure 16 : Schéma descriptif d'un procédé de réduction directe Midrex.....	280
Figure 17 : Schéma descriptif d'un procédé de réduction directe HYLIII .....	281
Figure 18 : Schéma descriptif d'un procédé de réduction fusion Corex .....	285

Figure 19 : Schéma descriptif d'un procédé de réduction fusion Hismelt.....	286
Figure 20 : Schéma descriptif d'un procédé de réduction fusion CCF.....	287
Figure 21 : Schéma descriptif de la coulée continue.....	291
Figure 22 : Schéma descriptif de la coulée de brames minces .....	292
Figure 23 : Schéma descriptif de la coulée en bandes minces.....	293
Figure 24: Schéma descriptif d'un procédé de laminage à chaud .....	294
Figure 25 : Le système énergétique de référence pour la sidérurgie cas de l'Europe .....	296
Figure 26 : Le système énergétique de référence pour la sidérurgie cas de la France.....	296
Figure 27 : répartition des consommations énergétiques dans la sidérurgie en France.....	306

# 1. Description du secteur

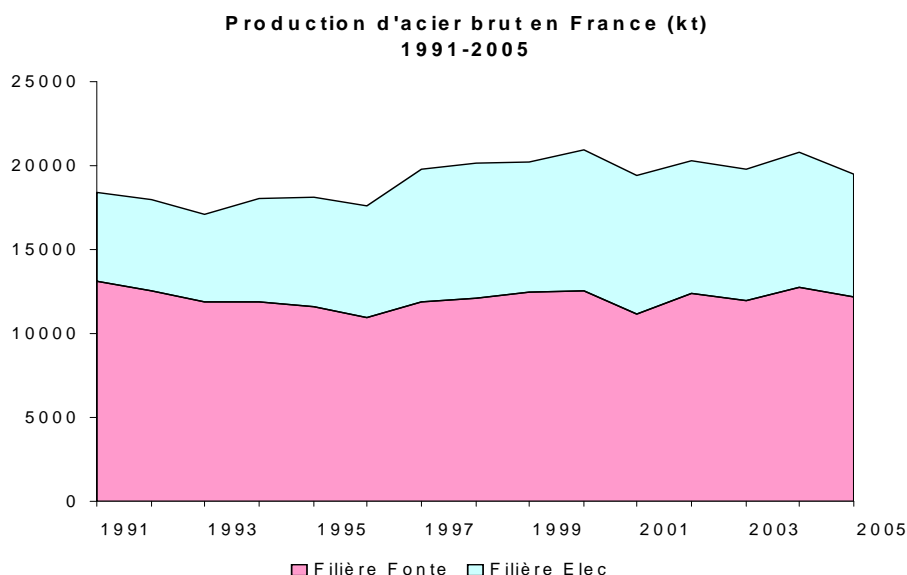
## 1.1. La sidérurgie en France en quelques chiffres<sup>1</sup>

### 1.1.1. La Production

Les tableaux et figures ci-dessous montrent depuis 1991, un accroissement relatif de la production d'acier brut en France et une stabilité depuis 2000, compte tenu d'une conjoncture économique marquée ces dernières années par de faibles taux de croissance du PIB en Europe ainsi qu'une monnaie forte. Par ailleurs, les consolidations dans le secteur de l'acier et la forte demande chinoise ont joué en faveur des sidérurgistes (augmentation des prix de l'acier) et leur ont permis de rétablir des marges confortables. Les consolidations dans ce secteur ont permis de passer d'une logique de contrôle des volumes à une logique de contrôle des marges, les sidérurgistes n'hésitent pas, comme en 2005, à réduire leurs productions pour maintenir une demande et des prix soutenus.

La concurrence entre les matériaux, l'amélioration des propriétés des aciers (qui se traduit par un allègement substantiel des pièces) et les progrès techniques réalisés dans le développement des procédés continus (diminution des chutes de métal) sont également des facteurs qui peuvent expliquer cette tendance.

La part de la filière électrique a crû assez régulièrement depuis le début des années 1990 et s'est stabilisée autour de 40% de la production globale d'acier depuis 1997. En France, le taux d'utilisation des installations productrices de fonte brute (hauts fourneaux) est de 94% en 2000, celui des installations de production d'acier brut de 87%. On peut noter depuis les années 1995 un « décrochage » de l'Europe par rapport à l'Amérique du nord et surtout l'Asie (Chine notamment) qui tire la croissance. La coulée continue (élaboration en continue de la fonte et de l'acier) représente 96% de la production française en 2005.



Source: FFA- IISI

**Figure 1 : production d'acier en kt**

On peut noter également la progression régulière des aciers plats et une stabilité de la production des aciers longs qui représentent environ 30% des aciers laminés à chaud. La production de produits plats issus du laminage à froid a augmenté de 13% entre 1994 et 2004, celle des tôles avec revêtement métallique de 56% pour la même période. Ces chiffres

<sup>1</sup> [Bethenod, 2007]



reflètent l'effort fait par le secteur sur les produits à plus forte valeur ajoutée (tôles pour l'automobile, emballages...).

Production française	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Production acier brut	18100	17633	19768	20126	20200	20956	19395	20258	19758	20770	19481
Production filière fonte	11559	10929	11893	12067	12464	12513	11167	12381	11988	12751	12181
Production filière Elec	6541	6704	7 875	8 059	7 736	8 443	8 228	7 877	7 770	8 019	7 300
Part de la filière Elec.	36%	38%	40%	40%	38%	40%	42%	39%	39%	39%	37%
Laminés à chaud (LAC)	15110	15178	16589	16823	17293	17474	16593	16491	16132	17374	nc
Produits longs (LAC)	4581	4472	4771	4706	4510	4828	4753	4611	4834	4766	nc
Produits plats (LAC)	10530	10717	11818	12115	12780	12646	11839	11880	11298	11946	nc
Part des produits longs	30%	29%	29%	28%	26%	28%	29%	28%	30%	27%	nc
Tôles laminées à froid	6486	6500	7426	7601	7791	8515	7489	7635	7308	7250	nc
Tôles avec revêtements métalliques	3064	3071	3548	3911	4196	4604	4343	4516	4383	4406	nc
Tôles avec revêtements non métalliques	603	617	738	945	973	1148	1115	1232	1165	1144	nc

**Tableau 1 : Production française (1991-2005) en Kt**

### 1.1.2. Importations et exportations

Les exportations et les importations d'acier françaises s'effectuent pour une large part à l'intérieur de l'Europe. Les échanges extra communautaires sont plus facilement justifiables sur les produits à haute valeur ajoutée. On notera d'ailleurs une progression plus importante dans l'exportation des produits plats que dans celle des produits longs depuis 1996.

En 2005, la France est exportatrice nette en produits sidérurgiques. Environ 80% de sa production est exportée. Cette même année, les importations représentent environ 84% de sa consommation apparente (production + exportation + stock – importation).

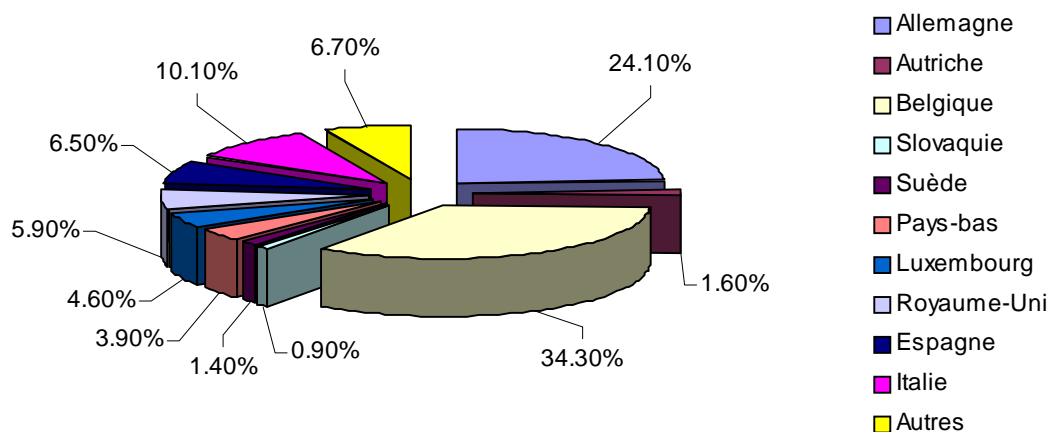
#### 1.1.2.1. Importations

Les importations françaises de produits sidérurgiques et de produits issus de la première transformation de l'acier ont chuté de 9,3% en 2005 retrouvant leur niveau de 2003.

Année	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
<b>Importations de la France toutes provenances (kt)</b>										
Lingots, 1/2 produits et produits longs	2 948	3 271	3 444	3 756	4129	4044	3 899	3587	3900	3431
1/2 produits et produits plats	6 157	7 084	8 427	9 078	11 105	9 861	9 713	9144	10290	9296
Ensemble	9 105	10 355	11 871	12 834	15 234	13 905	13 612	12 731	14 190	12 727
<b>Importations de la France en provenance des pays tiers hors UE (kt)</b>										
Lingots, 1/2 produits et produits longs	73	102	134	98	113	101	111	119	128	168
1/2 produits et produits plats	214	170	706	495	555	573	394	318	326	301
Ensemble	287	272	840	593	668	674	505	437	454	469

Source : F.F.A. et statistiques douanières

**Tableau 2 : Importations françaises d'acier**



Source: FFA

**Figure 2 : Répartition des importations françaises par provenance**

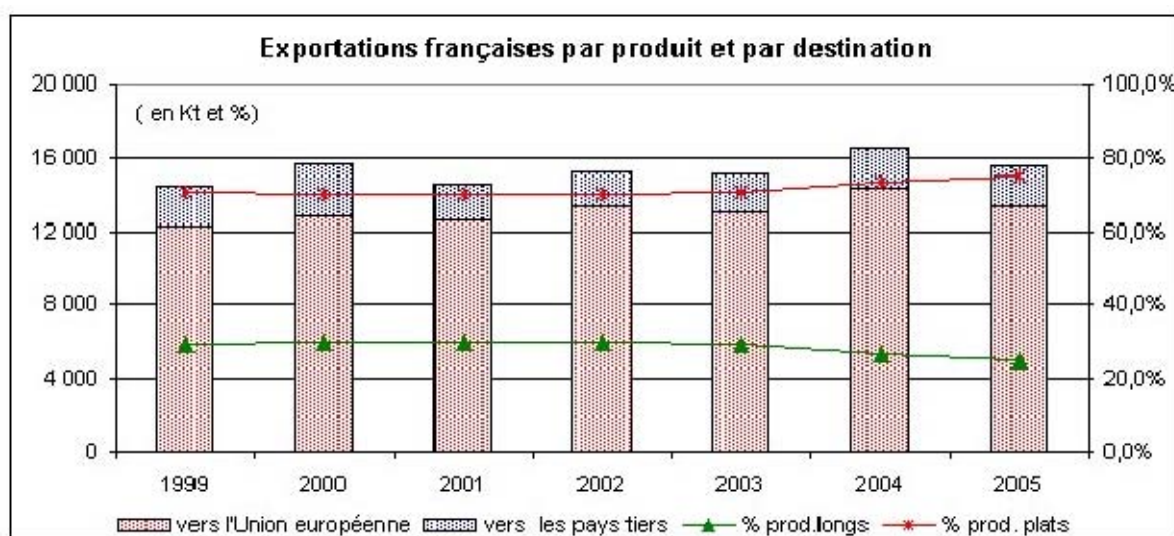
#### 1.1.2.2. Exportations

Les exportations françaises vers les pays de l'Union Européenne ont baissé en 2005 en liaison avec la baisse de la consommation apparente d'acier sur ces marchés.

Année	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
<b>Exportations de la France vers toutes destinations (kt)</b>										
Lingots, 1/2 produits et produits longs	3 481	4 242	4 256	4 266	4 677	4 372	4 512	4457	4437	3903
1/2 produits et produits plats	7 578	8 151	8 163	10 163	11 020	10 204	10 674	10967	12073	11669
Ensemble	11 059	12 393	12 419	13 676	14 977	14 149	14 748	15 424	16 510	15 572
<b>Exportations de la France vers les pays tiers (hors CE), kt</b>										
Lingots, 1/2 produits et produits longs	518	875	738	388	582	564	570	514	380	350
1/2 produits et produits plats	2 225	1 693	1 646	1 719	2 240	1 415	1 195	1631	1738	1853
Ensemble	2743	2568	2384	2107	2822	1979	1765	2145	2118	2203

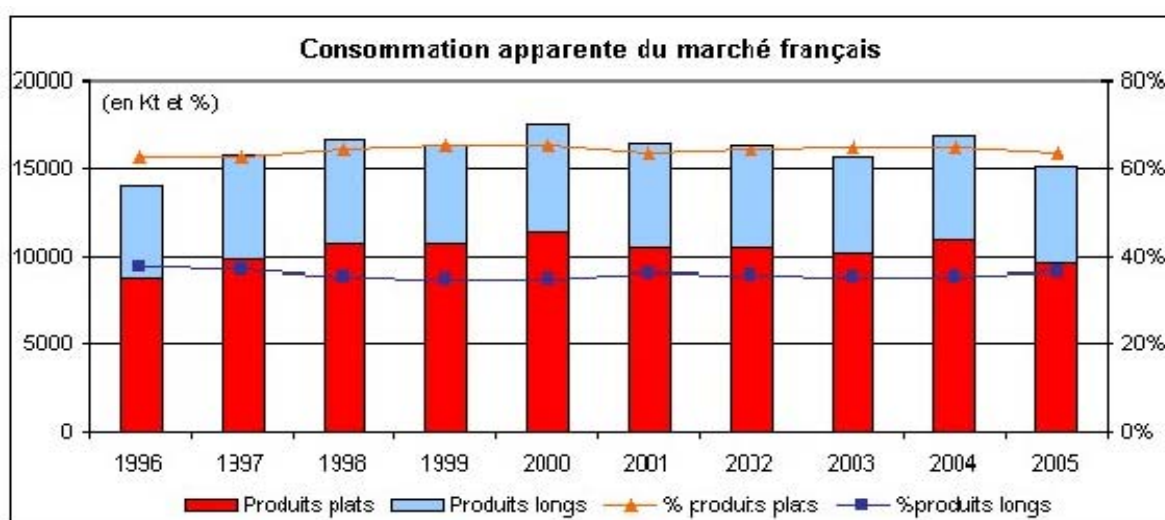
Source : F.F.A. et statistiques douanières

**Tableau 3 : Exportations françaises d'acier**



Source : F.F.A.

**Figure 3 : Exportations françaises par produit et par destination**



Source : F.F.A.

**Figure 4 : Consommation apparente du marché français**

## 1.2. La sidérurgie en Europe

La production brute dans l'union européenne a atteint 193,257 millions de tonnes en 2004 [Eurofer, 2005], soit 17% de la production mondiale, pour la France, l'Allemagne, l'Angleterre, l'Espagne et l'Italie soit respectivement, 20,77 (Oxygène 61%, Electrique 39%), 46,374 (oxygène 69%, Electrique 31%), 13,766 (Oxygène 78%, Electrique 22%).

Les deux tiers de la production d'acier brut de l'UE proviennent des hauts fourneaux, repartis sur 40 sites, le tiers restant provenant de 246 fours à arc électriques.

La production d'acier brut de l'Europe des 15 a subi des fluctuations entre 1995 et 2005 pour se stabiliser à 144,832 Mt, soit une augmentation de 5% par rapport au niveau de 1995, la croissance était beaucoup plus forte en 2004. Cependant, la production de l'Europe a repris de 140,7 à 147,5 Mt en 2003 et 2004 avant de chuter à 144,8 Mt en 2005.

On cite généralement quatre moyens pour la production d'acier : le classique haut fourneau convertisseur à oxygène, le four à arc, réduction fusion (smelting reduction) et la réduction directe.

En 2004, la production d'acier pour l'UE est répartie initialement entre l'acier de haut fourneau 62% et de four à arc (38%), soit une substitution de 3% de la filière haut fourneau par la filière électrique par rapport au niveau de 1998. Les estimations établies ne tiennent pas compte de la production des autres filières, notamment la réduction fusion et la réduction directe qui ne représentent qu'environ 4% de la production mondiale. En Europe la production d'acier par réduction directe (DRI) est limitée à 500 000 t/a, plus particulièrement en Allemagne et en Suède.

Le secteur de la sidérurgie compte environ 7% des émissions de CO<sub>2</sub>, dans le cas où les émissions des mines et du transport de minerai sont ajoutées, on atteint plus de 10%. Les émissions de CO<sub>2</sub> associées au secteur de la sidérurgie diffèrent d'un pays à un autre et dépendent de la quantité et du type de combustible utilisé [Moestad, 2003].

Année	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2005/ 2004
<b>Union Européenne (kt) (14 pays)</b>	<b>137 701</b>	<b>128 933</b>	<b>140 099</b>	<b>139 762</b>	<b>135 009</b>	<b>142 402</b>	<b>139 102</b>	<b>138 428</b>	<b>140 721</b>	<b>147 505</b>	<b>144 832</b>	<b>-1,8%</b>
<b>Autres pays (kt) du monde</b>	<b>596 460</b>	<b>603 427</b>	<b>614 967</b>	<b>595 487</b>	<b>613 619</b>	<b>661 568</b>	<b>670 392</b>	<b>723 489</b>	<b>785 718</b>	<b>873 658</b>	<b>943 343</b>	<b>+ 8%</b>
Chine	95 360	101 237	108 911	114 588	123 954	127 236	150 906	182 249	222 413	280 486	349 362	24,6%
Japon	101 640	98 801	104 545	93 548	94 192	106 444	102 866	107 745	110 511	112 718	112 473	-0,2%
U.S.A.	95 191	95 535	98 485	98 658	97 427	101 803	90 104	91 587	93 677	99 681	93 285	-6,4%
Russie	51 589	49 253	48 502	43 822	51 510	59 136	58 970	59 777	61 450	65 583	66 146	0,9%
Corée du sud	36 772	38 903	42 554	39 896	41 042	43 107	43 852	45 390	46 310	47 521	47 770	0,5%
Brésil	25 076	25 237	26 153	25 760	24 996	27 865	26 717	29 604	31 147	32 909	31 610	-3,9%
<b>Total Monde (66 pays) *</b>	<b>752 260</b>	<b>749 992</b>	<b>799 535</b>	<b>777 911</b>	<b>789 562</b>	<b>848 262</b>	<b>850 938</b>	<b>904 385</b>	<b>969 749</b>	<b>1 067 057</b>	<b>1 129 868</b>	<b>5,9%</b>

*Source : I.I.S.I. et Fédération Française de l'Acier*

**Tableau 4 : Production européenne et mondiale (1995-2005)**

### 1.3. Description des filières de production d'acier

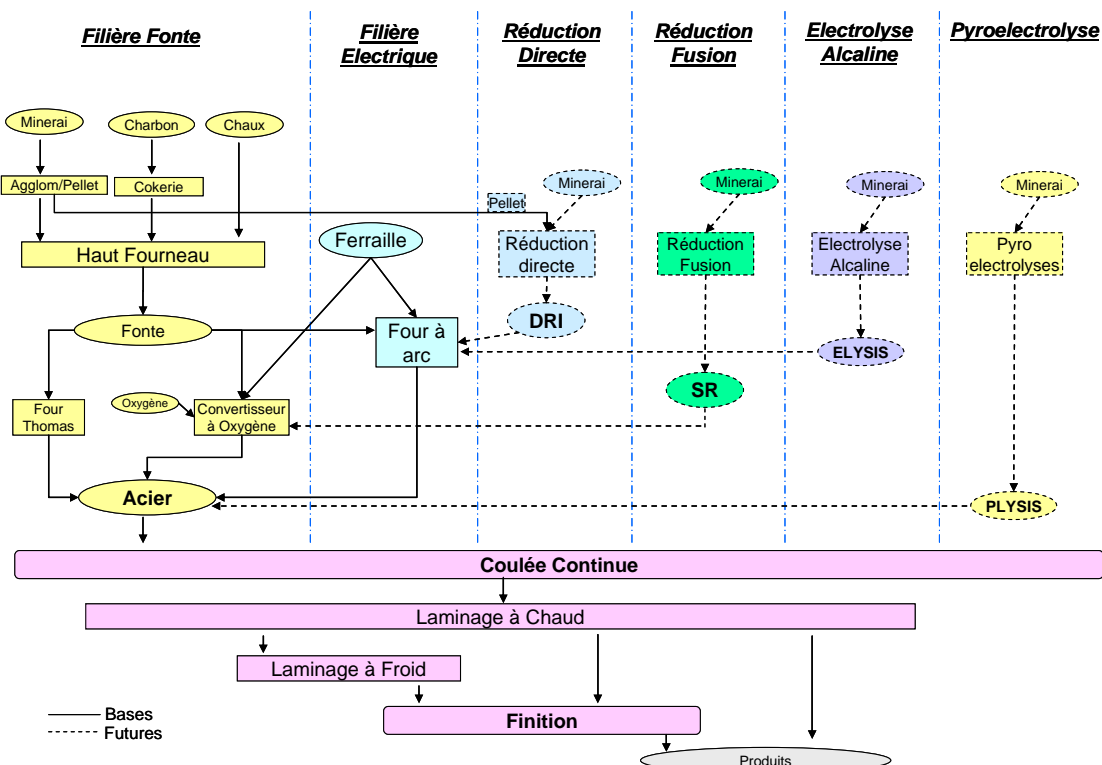
Nous passons en revue les différentes filières de production mettant en exergue les technologies (présentes et à venir) que nous avons représentées dans notre modèle. Pour chacune d'entre elles nous indiquons les principales entrées et sorties ainsi que les paramètres importants au sein d'un tableau synthétique.

Dans la sidérurgie, on compte principalement deux filières historiques et cinq autres alternatives pour la production d'acier. L'ensemble des ces filières est classé comme suit :

- Usine de sidérurgie intégrée (filière fonte) où l'on utilise le minerai et le coke pour produire de la fonte à partir du haut fourneau. La fonte est transformée en acier dans les convertisseurs à oxygène (le procédé BOF<sup>2</sup>).

<sup>2</sup> Blast Oxygen Furnace

- Petites usines de sidérurgie (filière électrique) où l'acier est produit à base de chutes de ferraille recyclée dans un four à Arc (le procédé EAF).
- Réduction directe (direct reduction), qui consiste en la réduction directe du minerai de fer, pour obtenir un minerai réduit, avant d'être acheminé vers four arc.
- Réduction fusion (Smelting Reduction), un procédé compétitif par rapport au traditionnel haut fourneau.
- Electrolyse alcaline
- Pyroélectrolyse

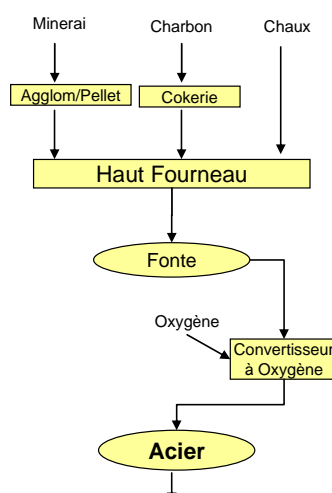


Source [Worrell, 1999] et notre propre présentation

**Figure 5 : Les filières de production d'acier**

Parmi les six modes de fabrication d'acier cités ci-dessus, la filière haut fourneau est la plus répandue et la plus complexe dans le secteur de l'acier.

### 1.3.1. La Filière Fonte



La production d'acier se compose de différentes unités intégrées composées par : la cokerie, l'agglomération, la pelletisation<sup>3</sup>, le haut fourneau et le convertisseur à oxygène.

La dépendance énergétique du secteur de l'acier est rendue complexe par les différents flux de consommation. Le charbon est l'énergie prépondérante parmi l'électricité, le gaz naturel et le fioul. On compte aussi les gaz sidérurgiques issus du haut fourneau, de la cokerie et du convertisseur à oxygène. La vapeur issue du haut fourneau et du convertisseur à oxygène est aussi utilisée dans d'autres procédés de fabrication.

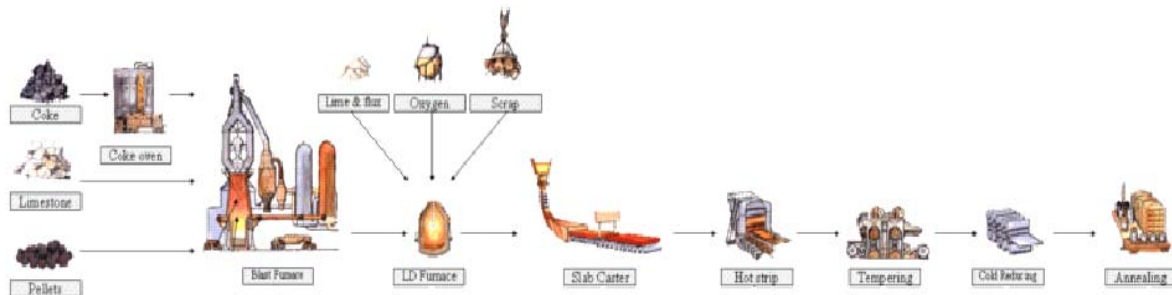
Les émissions de gaz à effet de serre (GES) émanant des sources liées aux procédés industriels des aciéries varient selon le type d'installation et les divers procédés utilisés (par exemple : les aciéries intégrées, les aciéries dotées de fours électriques à arc, les installations de réduction directe).

Dans les aciéries intégrées typiques, les émissions de CO<sub>2</sub> résultent :

- de la réduction de minerai de fer au moyen du coke (le coke est utilisé comme réducteur et comme combustible à la fois) métallurgique pour produire de la fonte dans le haut fourneau,
- d'autres réducteurs et additifs comme le charbon pulvérisé. Le mazout et le gaz naturel peuvent être utilisés.

Environ 75 % de l'ensemble du CO<sub>2</sub> émis est associé à l'utilisation du coke et du charbon pour la préparation du minerai de fer.

On peut également transformer le minerai de fer par réduction directe en se servant d'hydrogène (H<sub>2</sub>) et de monoxyde de carbone (CO) comme agents réducteurs.



**Figure 6: Procédés de fabrication : la filière fonte**

#### 1.3.1.1. Procédés de Fabrication existants

##### ➤ La Cokerie<sup>4</sup>

L'utilisation directe de houille comme agent réducteur dans les réacteurs d'élaboration de fer s'avère très difficile car elle ramollit et fond entre 350 et 500°C [Béranger, 1994], ce qui rend imperméable tout four à cuve. La cokéfaction s'est donc développée pour résoudre ce problème, cela consiste en un frittage de grains de charbon, lors du passage par la phase plastique et obtention de morceaux de coke de granulométrie adaptée à leur utilisation en four à cuve. Les charbons cokéfiant se caractérisent par leur passage à l'état plastique lorsqu'on les chauffe à l'abri de l'air. La cokéfaction repose sur trois phases essentielles:

- La préparation du charbon : cette technique consiste à associer des charbons de qualités différentes, de façon à produire, dans les meilleures conditions, le coke requis pour le haut

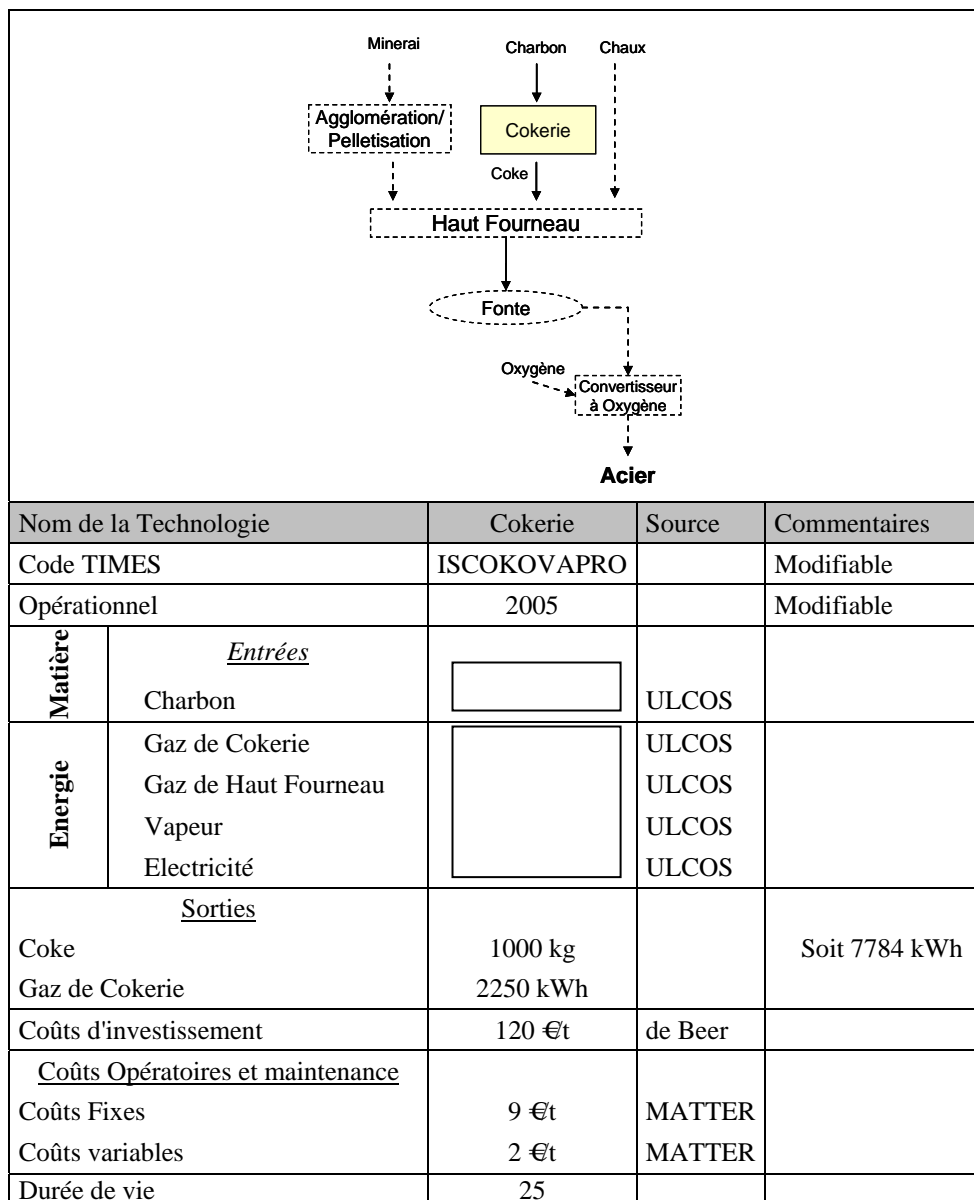
<sup>3</sup> Généralement concentré dans la mine, en Europe il existe une seule industrie utilisant la pelletisation.

<sup>4</sup> Les coûts opératoires et de maintenances représentent les coûts de main d'œuvre et de maintenance issus d'ULCOS

fourneau. Le mélange est broyé d'une manière à assurer une granulométrie homogène inférieure à 2mm.

- La cuisson du charbon dans le four à coke<sup>5</sup> : le charbon est chauffé à des températures très élevées de (1650 à 2200 °C) [U.S DE, 2000] à l'abri de l'air pour éliminer les produits volatils, le produit résultant est le coke.

Traitement des gaz résiduels ; le gaz résultant est le gaz de cokerie. Il est utilisé sous forme de combustible associé au gaz naturel au sein de la cokerie et dans d'autres procédés tel que le haut fourneau et le convertisseur à oxygène voire même dans le laminage à chaud.



**Tableau 5 : Description de la cokerie (données techniques et économiques)**

### ➤ L'Agglomération

L'usine d'agglomération sert à alimenter le haut fourneau avec l'aggloméré, cette technique consiste à assurer des caractéristiques chimiques et granulométriques très homogènes en un

<sup>5</sup> Le four à coke est constitué de deux grands murs en brique (les paneresses), d'une sole en réfractaires et d'une colonne montante. Les paneresses sont chauffées à haute température par des carneaux de chauffage regroupé en piédroits communs à deux fours ce qui forme une batterie de 25 à 50 fours.

frittage réactif du minerai de fer, de façon à obtenir un produit dont la granulométrie soit dans la gamme de 5 à 50 mm [BREF, 2001]. La matière première, le minerai de fer, le coke et la chaux, sont mélangés avant l'opération d'agglomération. Ceci implique généralement de poser les matériaux dans des secteurs de préparation avec les quantités requises. A ce stade, d'autres matières peuvent être ajoutées, tels que les produits recyclés.

On distingue généralement deux techniques d'agglomération :

- agglomération en boulettes (billes de 8 à 20 mm) lorsque le minerai est très fin : le frittage est assuré par un chauffage à 1300°C par des fumées de combustion. Ce type d'installation existe surtout dans les mines de fer,

- aggloméré sur grille (exemple : technique utilisée dans les usines de Sollac) : elle consiste en un frittage réactif avec passage partiel à l'état liquide. L'énergie étant fournie par la combustion d'un combustible solide (poussier de coke) mélangé au minerai. Le mélange minerai-charbon est humidifié, puis déposé sur une grille. Le processus de frittage est amorcé par aspiration de fumées chaudes ensuite entretenues par aspiration d'air. Cette aspiration est maintenue, grâce à une dépression sous la grille, pendant le temps nécessaire à la combustion complète du combustible. La partie supérieure de la couche est partiellement refroidie par l'air aspiré, à mesure que le front de flamme se propage vers le bas. En fin de chaîne, l'aggloméré est transféré vers un refroidisseur à air destiné à évacuer la chaleur résiduelle.

L'aggloméré produit se caractérise par des propriétés physico-chimiques précises, celles-ci permettent de jouer sur la qualité de la fonte.

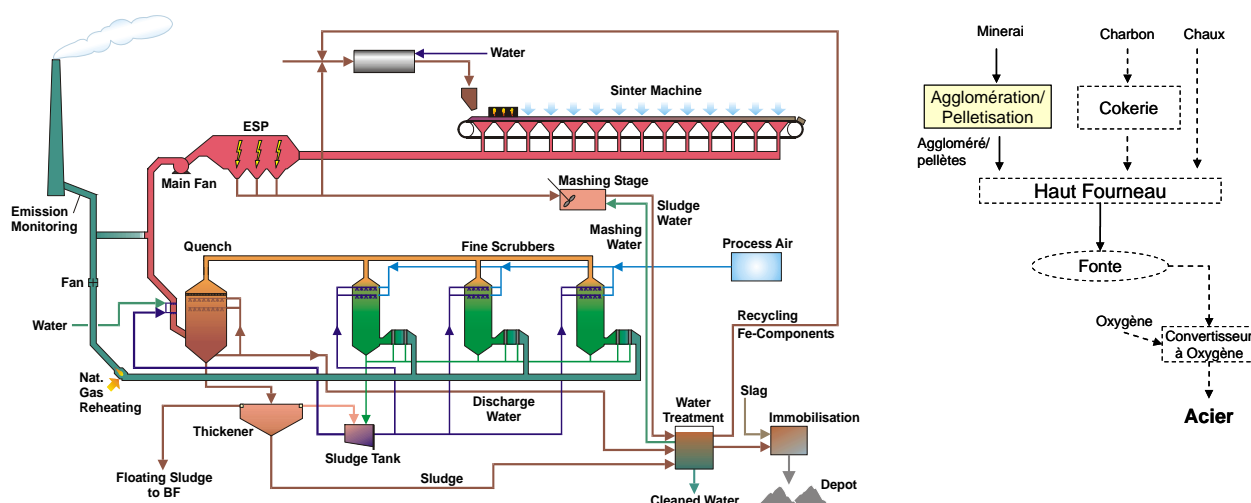


Figure 7 : Schéma descriptif d'une usine d'agglomération de minerai de fer

Nom de la Technologie		Agglomération sur Grille	Source
Code TIMES		ISSNTRPRO	
Opérationnel		2005	
Matière	<u>Entrées</u>		
	Minerai de fer		ULCOS
	Aggloméré fin		ULCOS
	DRI fin		ULCOS
	Chaux Morceau		ULCOS
	Chaux brûlée		ULCOS
Energie	Coke		ULCOS
	Gaz de cokerie		ULCOS
	Electricité		ULCOS





<u>Sorties</u>		
Aggloméré sur grille	1000 kg	
Coûts d'investissement	50 €/t	MATTER
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>		
Coûts Fixes	2,5 €/t	MATTER
Coûts variables	5,5 €/t	MATTER
Durée de vie	25	

**Tableau 6 : Description de l'agglomération (données techniques et économiques)**

➤ **La Pelletisation**

La pelletisation est un autre procédé de traitement des matériaux ferreux proche de l'agglomération. Ces deux procédés complémentaires servent à assurer des caractéristiques chimique et physique au minerai de fer pour alimenter le haut fourneau. Alors que pour différentes raisons : la disponibilité des poussières de coke sur les sites des aciéries, la possibilité de permettre la réutilisation des déchets solides et la tendance à se dégrader pendant la phase de traitement et le transport, l'agglomération a presque toujours lieu sur le site des aciéries. Les pellets sont principalement fabriqués sur le site de la mine ou de son port d'expédition. Le pellet est formé à base de minerai de fer fin avec des additifs de < 0,05 mm à des billes entre 9 et 16 mm avec une très haute température. Dans toute l'union européenne, il existe une seule aciérie intégrée avec une installation de pelletisation au Pays-Bas, et quatre installations autonomes en Suède [BREF, 2001].

Nom de la Technologie		Pelletisation	Source
Code TIMES		ISPELTPRO	
Opérationnel		2005	
<b>Matière</b>	<u>Entrées</u>		
	Minerai de fer		ULCOS
	Chaux Morceau		ULCOS
	Chaux brûlée		ULCOS
<b>Energie</b>	Gaz Natural		ULCOS
	Electricité		ULCOS
<u>Sorties</u>			
Pellets		1000 kg	
Coûts d'investissement		55 €/t	MATTER
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>			
Coûts Fixes		3 €/t	MATTER
Coûts variables		4,3 €/t	MATTER
Durée de vie		25	

**Tableau 7 : Description de l'agglomération (données techniques et économiques)**

➤ **Le Haut Fourneau**

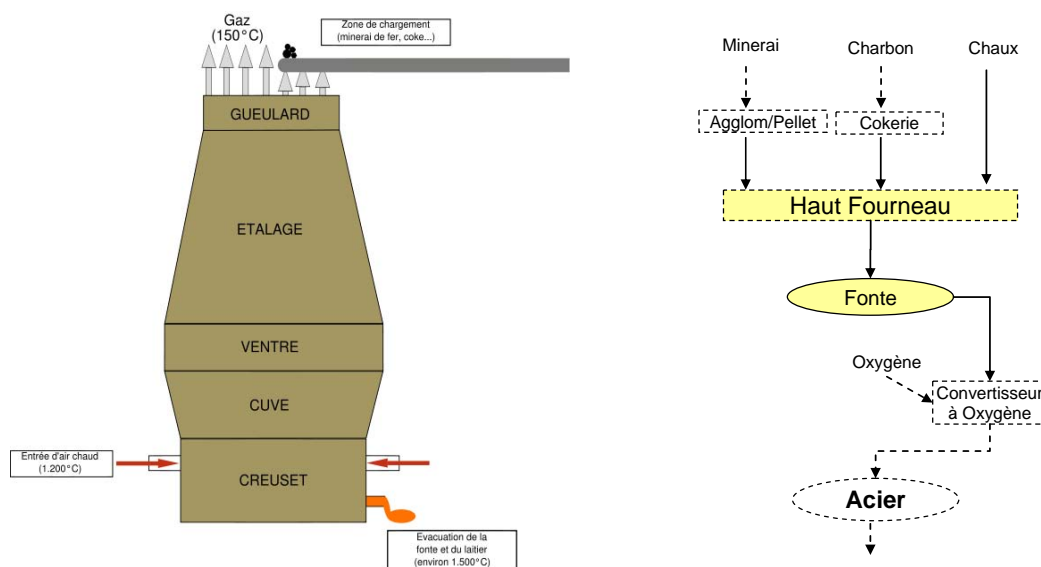
Un haut-fourneau est un four à combustion interne, destiné à la fabrication de la fonte à partir du minerai de fer, il se compose d'une cuve de forme cylindrique constituée de briques réfractaires soutenues par une armature extérieure de poutrelles métalliques, du creuset qui reçoit les matières en fusion, de la tuyère ou orifice de soufflage, du gueulard ou ouverture supérieure qui permet le chargement ainsi que l'expiration des gaz et des fumées.

Le chargement de la matière première par le haut (Gueulard) est constitué essentiellement de minerai de fer, déchets ferreux, coke et /ou charbon. La récupération de la fonte s'opère par coulée au bas du four. Dans le même temps se produit une coulée de laitier qui permet la récupération des déchets de la fusion (ou scories). Pour permettre la fusion de tous les éléments de la charge il est indispensable d'entretenir la combustion par une injection d'air qui s'effectue au large du four.

Dans le haut fourneau la température se caractérise par palier, elle est variable en fonction de la hauteur dans la cuve :

- 300 °C au niveau du gueulard, phase de dessiccation<sup>6</sup>,
- 400 °C à 800 °C, phase de réduction,
- 900 °C à 1 200 °C, phase de carburation,
- 1 800 °C, phase de fusion,
- 1 600 °C, phase de liquation, lieu des coulées.

Compte tenu de la forte présence de carbone au cours du procédé, le produit obtenu est un alliage fer-carbone de type fonte (taux de carbone supérieur à 2,1 %).



**Figure 8 : Schéma descriptif d'un haut fourneau**

<sup>6</sup> La dessiccation est le phénomène de perte de l'eau se trouvant à l'intérieur de certains produits.

Nom de la Technologie		Haut Fourneau	Source
Code TIMES		ISBLAFURPRO	
Opérationnel		2005	
Matière	<u>Entrées</u>		
	Aggloméré		ULCOS
	Minerai de fer		ULCOS
	Pellets		ULCOS
	HP Oxygène		ULCOS
	LP Oxygène		ULCOS
	Azote		ULCOS
Energie	Charbon injecté		ULCOS
	Coke		ULCOS
	Gaz de cokerie		ULCOS
	Gaz de Haut Fourneau		ULCOS
	Gaz de Convertisseur		ULCOS
	Gaz naturel		ULCOS
	Electricité		ULCOS
<u>Sorties</u>			
Fonte			
Gaz de Haut Fourneau			ULCOS
Laitier de Haut Fourneau			ULCOS
Coûts d'investissement		150 €/t	MATTER
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>			
Coûts Fixes		10 €/t	MATTER
Coûts variables		2 €/t	MATTER
Durée de vie		25	

Tableau 8 : Description d'un haut fourneau (données techniques et économiques)

### ➤ Le Convertisseur à Oxygène

Appareil dans lequel est réalisée la conversion de la fonte liquide en acier liquide par injection d'oxygène gazeux. Il se présente sous la forme d'une cornue garnie du revêtement interne en réfractaire basique.

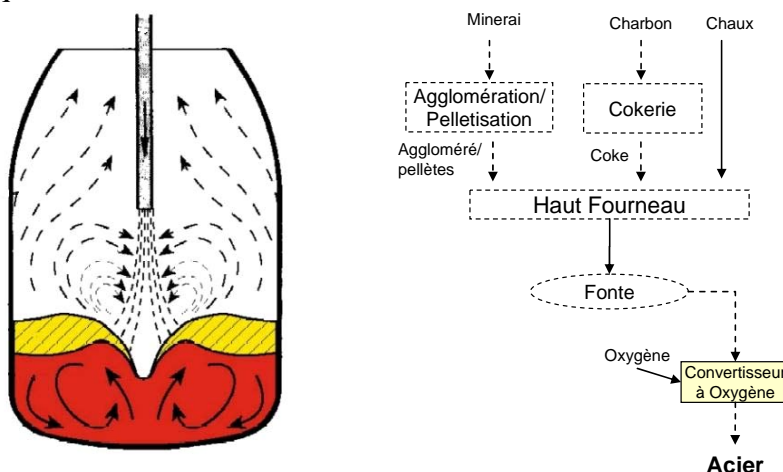


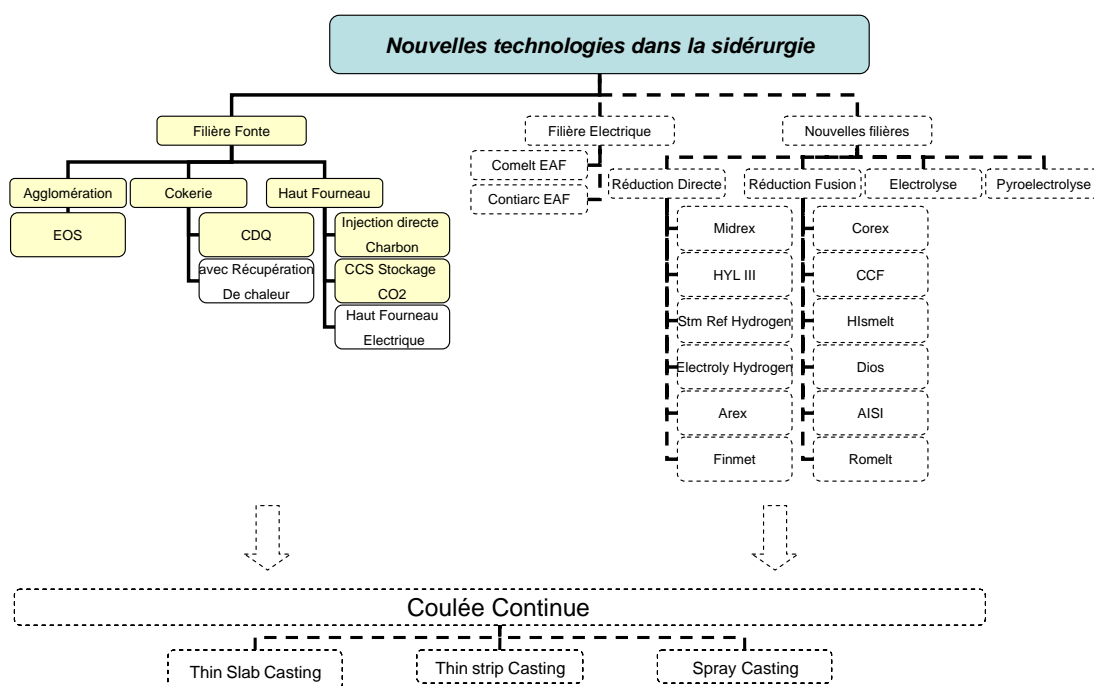
Figure 9 : Schéma descriptif d'un convertisseur à oxygène

Pour l'élaboration des aciers au carbone, il existe deux familles de convertisseurs : un à soufflage par le haut et l'autre à soufflage par le fond. Ces appareils ont évolué pour devenir des convertisseurs à soufflage combiné : brassage par le fond pour les appareils à soufflage par le haut, et soufflage d'oxygène par le haut pour les convertisseurs à soufflage par le fond.

Nom de la Technologie		Convertisseur à Oxygène		Source
Code TIMES		ISBOXFURPRO		
Opérationnel		2005		
Matière	<u>Entrées</u>			
	Fonte			ULCOS
	DRI			ULCOS
	Ferraille			ULCOS
	Minerai de fer			ULCOS
	Chaux brûlée			ULCOS
	Dolomite			ULCOS
	HP Oxygène			ULCOS
	Azote			ULCOS
Energie	Gaz de cokerie			ULCOS
	Vapeur			ULCOS
	Gaz naturel			ULCOS
	Electricité			ULCOS
<u>Sorties</u>				
Acier liquide		1000 kg		
Gaz de BOF		183,5 kWh/t		
Coûts d'investissement		100 €/t		MATTER
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>				
Coûts Fixes		4 €/t		MATTER
Coûts variables		50 €/t		MATTER
Durée de vie		25		

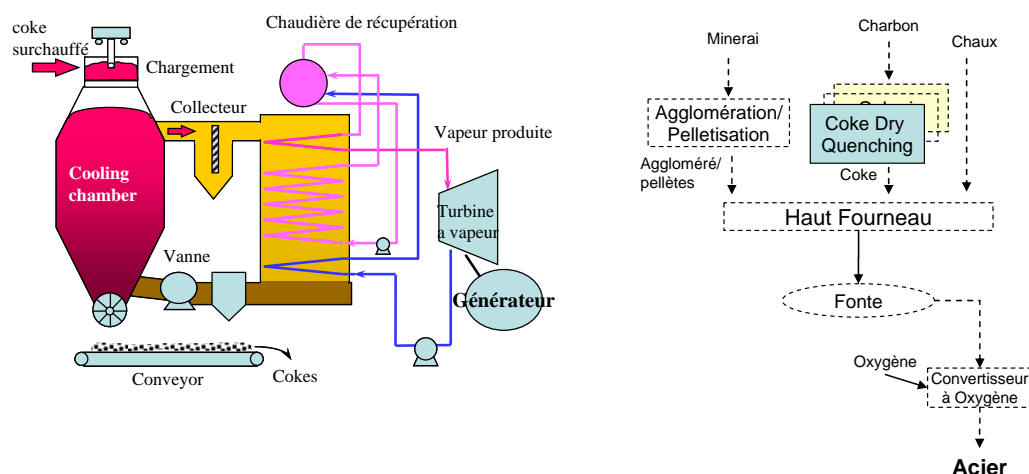
**Tableau 9 : Description d'un convertisseur à oxygène (données techniques et économiques)**

### 1.3.1.2. Nouvelles Technologies considérées



### ➤ Extinction à sec du Coke (Coke Dry Quenching)

La production de coke implique de chauffer le charbon à des températures très élevées pendant 12 à 18 heures [M.K. Jaccard & Associates, 2004]. A la fin de cette opération, on procède à l'extinction à l'eau du coke issu du four. Dans l'extinction sèche du coke (CDQ), une cuve spéciale est conçue pour recevoir le coke déchargé. La cuve est une sorte de chambre spéciale vide contenant un gaz inerte (azote) [World Bank Group, 1998] qui permet de refroidir le coke. La vapeur récupérée est utilisée pour la production d'électricité via des turbines à vapeur.



**Figure 10 : Schéma descriptif d'une cokerie (CDQ)**

Nom de la Technologie		Cokerie CDQ	Source	Commentaires
Code TIMES		ISCOKDQPRO		Modifiable
Opérationnel		2005		Modifiable
Matière	<u>Entrées</u>			
	Charbon		ULCOS, Yamaguchi	Base de 1200 kg (ICARUS-4 estime une baisse de 389,2 kWh)
Energie	Gaz de Cokerie		ULCOS	Aucune réduction n'est spécifiée dans ICARUS-4.
	Gaz de Haut Fourneau		ULCOS	
	Vapeur		ULCOS	
	Electricité		ULCOS	
<u>Sorties</u>				
Coke		1000 kg		Soit 7784 kWh
Gaz de Cokerie		2250 kWh		
Coûts d'investissement		170 €/t	Yamaguchi	
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>				
Coûts Fixes		9 €/t	Yamaguchi	
Coûts variables		2 €/t	Yamaguchi	
Durée de vie		10	ICARUS-4	Durée de vie standard

**Tableau 10 : Description d'une cokerie (CDQ) (données techniques et économiques)**

### ➤ Agglomérer avec Optimisation des Emissions (EOS)

Le concept de base de cette installation est de recycler les gaz de carneau de près de moitié (50%) en les utilisant comme air de combustion, ce qui augmente l'efficacité énergétique. Le recyclage d'une part des gaz résiduels de l'aggloméré, permettra la réduction de leur traitement à la sortie, limitera les émissions des polluants notamment les PCDD/F de 50% et réduire la consommation des combustibles solides (10-15% du poussier de Coke).

Ces techniques sont utilisées dans le cadre d'installations nouvelles ou existantes. Nous ne disposons pas de données économiques chiffrées. Les données d'investissement sont spécifiques au site, mais l'application des systèmes de récupération de chaleur permettra de réduire les coûts opératoires.

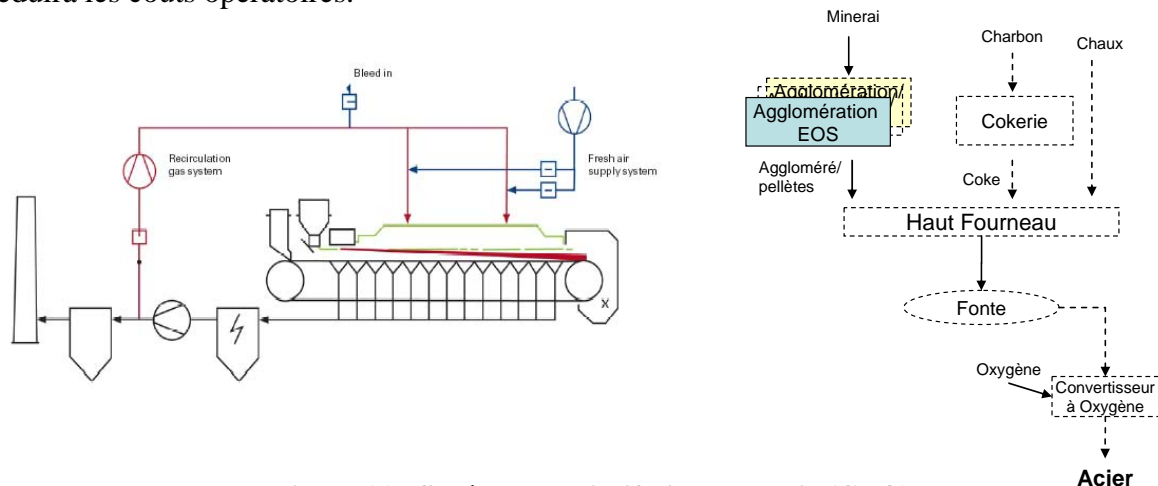


Figure 11 : Schéma descriptif d'une cokerie (CDQ)

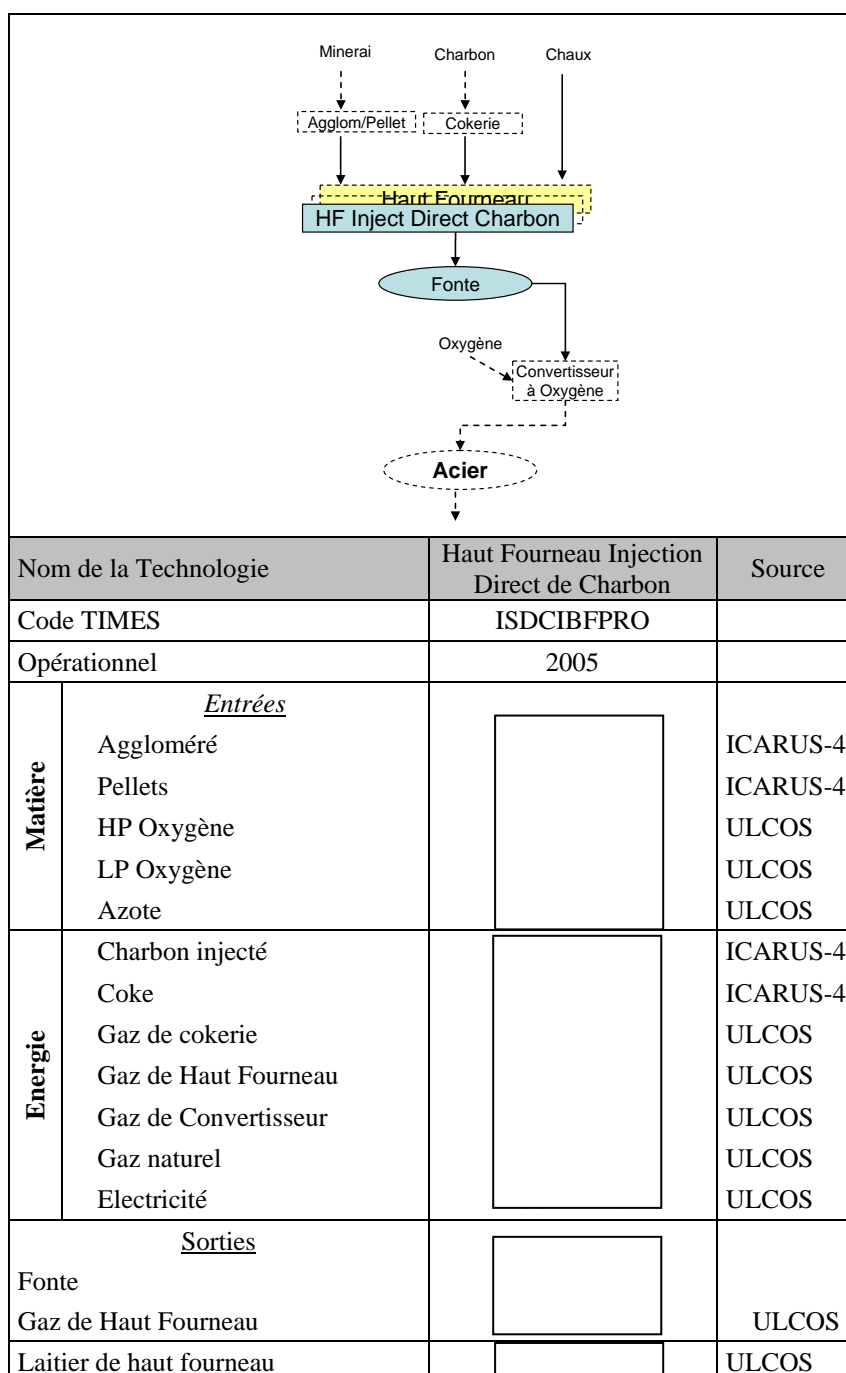
Nom de la Technologie		Agglomération sur Grille EOS	Source	Commentaires
Code TIMES		ISEOSSNTRPRO		Modifiable
Opérationnel		2005		Modifiable
Matière	<u>Entrées</u>			
	Minerai de fer		BREF	Moyenne entre 680 - 850 Kg/t
	Aggloméré fin		ULCOS	
	DRI fin		ULCOS	Moyenne entre 105 - 190 Kg/t
	Chaux Morceau		BREF	
Energie	Coke		ULCOS,	une consommation 15% inférieure qu'une agglomération sur grille conventionnel
	Gaz de cokerie		BREF	
	Electricité		ULCOS	
			ULCOS	
<u>Sorties</u>				
Aggloméré sur grille		1000 t		
Coûts d'investissement		Supplément 10 €/t		Hypothèse
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>				
Coûts Fixes		2,5 €/t		Hypothèse
Coûts variables		4,5 €/t		Hypothèse
Durée de vie		25		Durée de vie standard

Tableau 11 : Description d'une cokerie (CDQ) (données techniques et économiques)

➤ **Haut fourneau avec injection directe du charbon**

L'injection de charbon dans les hauts fourneaux contribue à accroître leur productivité, à réduire la consommation de coke et à améliorer le contrôle du procédé. En plus il s'avère moins énergivore que les opérations entièrement à base de coke. Pour obtenir le maximum d'efficacité, il faut soigneusement doser les caractéristiques du charbon injecté afin d'adapter celui-ci au fonctionnement du haut fourneau utilisé.

Les propriétés du charbon influent sur sa combustion, le refroidissement du chemin de roulement et la quantité de coke qu'il est possible de remplacer. Les charbons les plus acceptables présentent une bonne combustibilité, se composent de produits de combustion réactifs et exigent un refroidissement minimum du chemin de roulement. Les charbons qui montrent de faibles effets de refroidissement peuvent être injectés en grandes quantités.

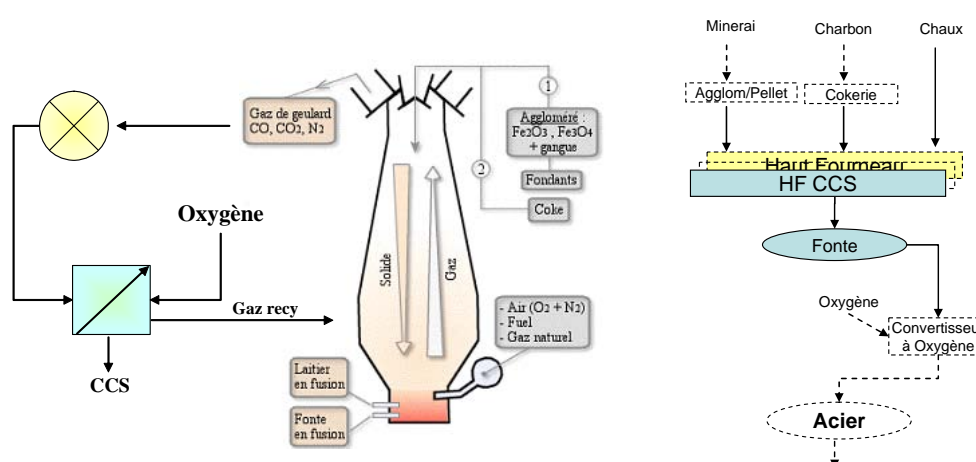


Coûts d'investissement	190 €/t	ICARUS-4
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>		-
Coûts Fixes	10 €/t	ICARUS-4
Coûts variables	2 €/t	ICARUS-4
Durée de vie	25	

**Tableau 12 : Description d'un haut fourneau avec injection direct du charbon (données techniques et économiques)**

➤ **Haut fourneau séquestration et stockage de CO<sub>2</sub> (CCS)**

Cette technique consiste en un haut fourneau classique ou avec injection directe de charbon auquel on a associé une technologie de récupération, traitement et stockage de CO<sub>2</sub>.



**Figure 12: Schéma descriptif d'un haut fourneau avec séquestration et stockage de CO<sub>2</sub> (CCS)**

Nom de la Technologie		Haut Fourneau CCS	Source
Code TIMES		ISCCSBFPRO	
Opérationnel		2020 (ICARUS-4, 2010)	
Matière	<u>Entrées</u>		
	Aggloméré		ULCOS
	Minerai de fer		ULCOS
	Pellets		ULCOS
	HP Oxygène		ULCOS
	LP Oxygène		ULCOS
	Azote		ULCOS
Energie	Charbon injecté		ULCOS
	Coke		ULCOS
	Gaz de cokerie		ULCOS
	Gaz de Haut Fourneau		ULCOS
	Gaz de Convertisseur		ULCOS
	Gaz naturel		ULCOS
	Electricité		ULCOS

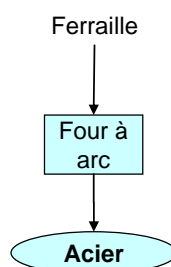


<u>Sorties</u>		
Fonte	1000 kg	ICARUS-4
CO <sub>2</sub>	-983 kg	
Gaz de Haut Fourneau	1352 kWh/t	
Coûts d'investissement	300 €/t	ICARUS-4
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>		
Coûts Fixes	15 €/t	ICARUS-4
Coûts variables	5 €/t	ICARUS-4
Durée de vie	25	

**Tableau 13 : Description d'un haut fourneau avec séquestration et stockage de CO<sub>2</sub> (données techniques et économiques)**

### 1.3.2. La Filière Electrique

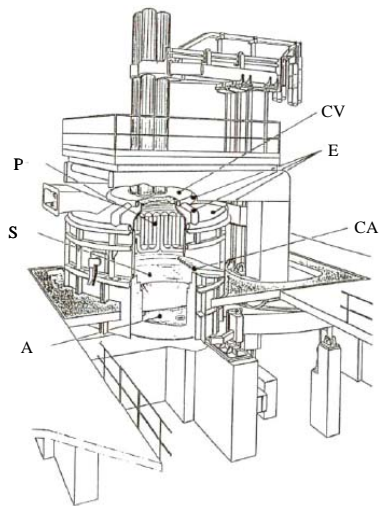
La filière électrique est une autre filière de production d'acier basée sur l'utilisation des ferrailles en tant que matière première. L'énergie nécessaire à la fusion du fer solide est fournie sous forme d'énergie électrique au moyen d'arcs.



#### 1.3.2.1. Procédés de Fabrication existants

##### ➤ Four à Arc

Le four à arc est essentiellement un outil de production d'acier liquide à partir de ferrailles, celles-ci pouvant être remplacées partiellement par de la fonte ou du minerais pré réduits. Un four à arc se compose d'une cuve cylindrique ou ovale d'acier garni de réfractaires, basculante pour la coulée et le décrassage et destinée à recevoir la charge métallique qui est fondue au moyen de trois électrodes. La cuve peut être divisée en deux ou trois parties amovibles pour faciliter l'entretien du garnissage. L'énergie nécessaire est fournie par des arcs électriques jaillissant entre des électrodes en graphite et la charge. Pour une tension donnée, le seul moyen efficace de faire varier la puissance de l'arc est donc d'agir sur sa longueur. L'affinage de l'acier fondu est réalisé par réaction du métal liquide avec un laitier à base de chaux. L'opération de fusion est souvent accompagnée, ou suivie, d'une opération de décarburation et de déphosphoration réalisée par addition de minerai de fer ou insufflation d'oxygène dans le bain.



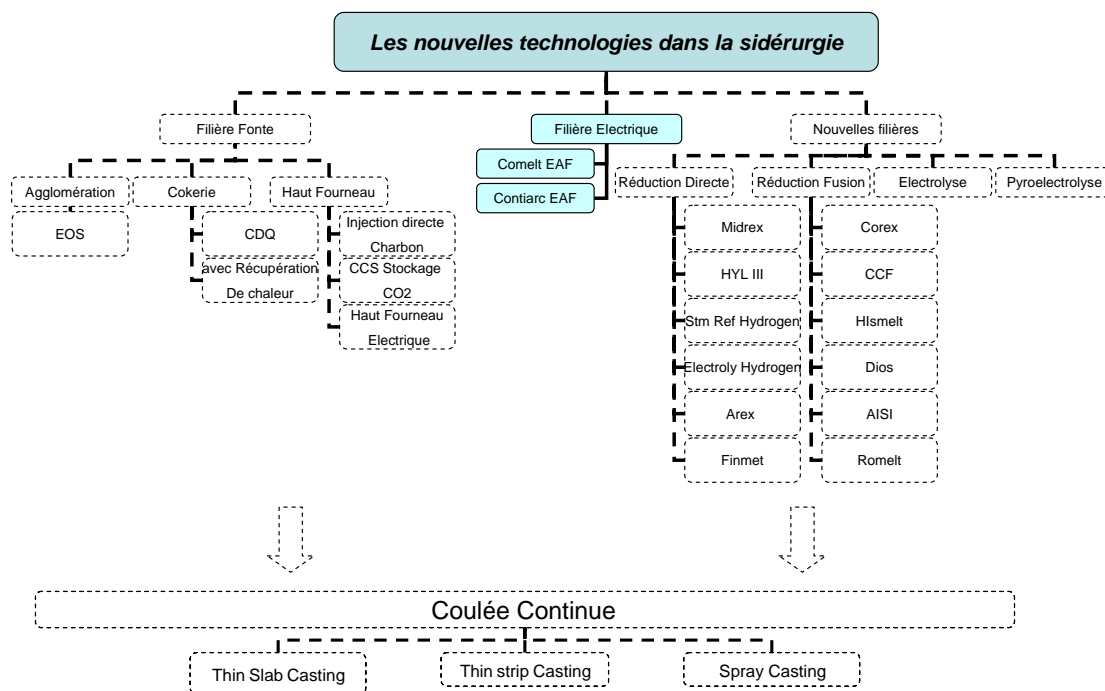
- A avant creuset permettant la coulée par trou excentré  
 CA couvercle de l'avant creuset à circulation d'eau  
 CV centre de voûte en réfractaire  
 E élément de voûte à circulation d'eau  
 P panneaux de cuve à circulation d'eau  
 S sole réfractaire

**Figure 13 : Schéma descriptif d'un four a arc**

Nom de la Technologie		Four Arc Electrique	Source
Code TIMES		ISEARCFURPRO	
Opérationnel		2005	
Matière	<u>Entrées</u>		
	Fonte		ULCOS
	DRI		ULCOS
	Ferraille		ULCOS
	Minerai de fer		ULCOS
	Chaux		ULCOS
	Chaux brûlée		ULCOS
	Dolomite		ULCOS
	Electrodes		ULCOS
	HP Oxygène		ULCOS
	Azote		ULCOS
Energie	Charbon		ULCOS
	Gaz naturel		ULCOS
	Electricité		ULCOS
<u>Sorties</u>			
Acier liquide		1000 kg	
Coûts d'investissement		150 €/t	MATTER
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>			
Coûts Fixes		12 €/t	MATTER
Coûts variables		19 €/t	MATTER
Durée de vie		25	

**Tableau 14 : Description d'un four à arc (données techniques et économiques)**

### 1.3.2.2. Nouvelles technologies considérées



#### ➤ Four à arc Comelt

Le four Comelt est un four électrique avec le même principe qu'un four à arc, il est basé sur un type d'électrode développé par Voest-Alpine Industries, Autriche [Berger, 1995]. Dans la plupart des cas le four est décrit avec quatre électrodes inclinées, résultant d'une transmission de l'énergie électrique par quatre arcs à courant continu (DC). Les arcs électriques inclinés, d'une longueur d'un mètre, atteignent la charge à travers l'axe des électrodes. Les gaz chauds du procédé sont injectés au milieu de la pile de ferraille puis ils remontent à travers la colonne de ferraille dans le four et l'axe de préchauffage.

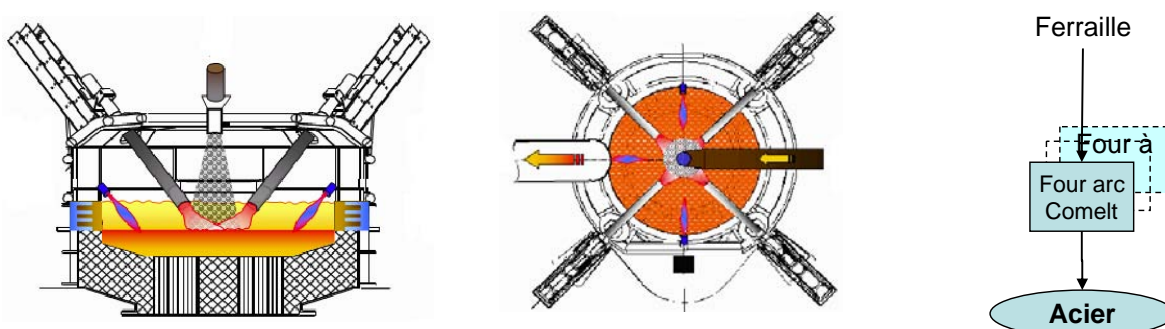


Figure 14 : Schéma descriptif d'un four à arc Comelt

Nom de la Technologie		Four à arc Comelt	Sources	Commentaires
Code TIMES		ISCMLTEAFPRO		
Opérationnel		2005		
Matière	<u>Entrées</u>			
	Fonte		ULCOS	
	DRI		ULCOS	
	Ferraille		ULCOS	
	Minerai de fer		ULCOS	
	Electrodes		ULCOS	
Energie	Charbon		ULCOS	
	Gaz Naturel		EIFER	0,24 GJ
	Electricité		EIFER	
<u>Sorties</u>				
Acier Liquide		1000 kg		
Coûts d'investissement		170 €/t		Non renseignés (A actualiser)
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>				
Coûts Fixes		10 €/t		Non renseignés (A actualiser)
Coûts variables		20 €/t		Non renseignés (A actualiser)
Durée de vie		25		

**Tableau 15 : Description d'un four à arc Comelt (données techniques et économiques)**

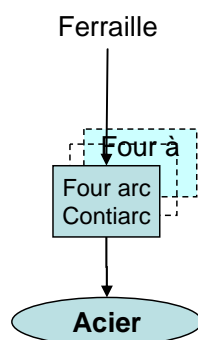
Les avantages les plus essentiels sont les suivants:

- Meilleur équilibre du positionnement des endroits chaud et froid dû au changement de l'inclinaison de l'axe de l'électrode et/ou pivotement horizontal.
- La position inclinée des électrodes permet une dépendance moindre du laitier moussant et la taille de l'arc qui doit être rempli est réduite par rapport à un procédé électrique conventionnel à électrode vertical.
- Recharge automatique d'une des quatre électrodes tout en gardant la puissance.
- Réduction de la consommation totale d'énergie avec un préchauffage intégré de la ferraille (360 MJ/t par rapport à un EAF conventionnel).
- Forte productivité.
- Réduction de la consommation d'électrodes approximativement de 30%.
- Réduction des coûts de maintenance.
- Réduction de l'usure de l'électrode soit une consommation de 1,8 kg d'électrode/t acier produit.
- Réduction du niveau de bruit.

#### ➤ Four a Arc Contiarc

Le four arc Contiarc (Continuous arcing) développé par Mannesmann Demag (Allemagne), est un four annulaire à fonctionnement continu (au lieu d'un système batch) avec une électrode centrale en Courant Continu (CC), en principe il peut également être chauffé par le courant alternatif [Reichelt, 1996 ]. Le four à arc Contiarc est chargé sans interruption avec de la ferraille. Cependant, la chute est préchauffée par les gaz chauds ascendants du four

(préchauffage de ferraille à hautes températures intégré).



Nom de la Technologie		Sources	Four à arc Contiarç	Commentaires
Code TIMES			ISCNTEAFPRO	
Opérationnel			2005	
Matière	<u>Entrées</u>			
	Fonte	ULCOS		
	DRI	ULCOS		
	Ferraille	ULCOS		
	Minerai de fer	ULCOS		
	Electrodes	EIFER		
Energie	Charbon	ULCOS		
	Gaz Naturel	EIFER		0,6 GJ
	Electricité	EIFER		
<u>Sorties</u>				
Acier Liquide			1000 kg	
Coûts d'investissement		MATTER	160 €/t	Non renseignés (A actualiser)
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>		-		
Coûts Fixes		MATTER	10 €/t	Non renseignés (A actualiser)
Coûts variables		MATTER	20 €/t	Non renseignés (A actualiser)
Durée de vie			25	

**Tableau 16 : Description d'un four à arc Contiarç (données techniques et économiques)**



La réduction est effectuée dans des fours à cuve utilisant, comme gaz réducteur, du gaz naturel dissocié par catalyse. La réduction peut aussi avoir lieu dans des fours rotatifs produisant le gaz réducteur à partir du charbon (10% de la production totale de DRI) [Steffen, 2004]. En outre, des installations à lit fluidisé ont été construites pour la réduction des minerais fins. Elles requièrent un gaz réducteur riche en hydrogène.

Dans ce procédé, l'oxyde de fer est introduit par le sommet d'un four à cuve. Il descend dans la cuve et est chauffé à l'aide d'un gaz dirigé à contre-courant, composé d'hydrogène et de monoxyde de carbone, ce dernier résultant du craquage du gaz naturel. La matière résultante est refroidie et évacuée de la cuve sous forme de fer de réduction directe ou est soumise à un briquetage à chaud puis refroidie. Habituellement, le fer de réduction directe contient entre 90 et 93 % de carbone.

### ➤ Midrex<sup>7</sup>

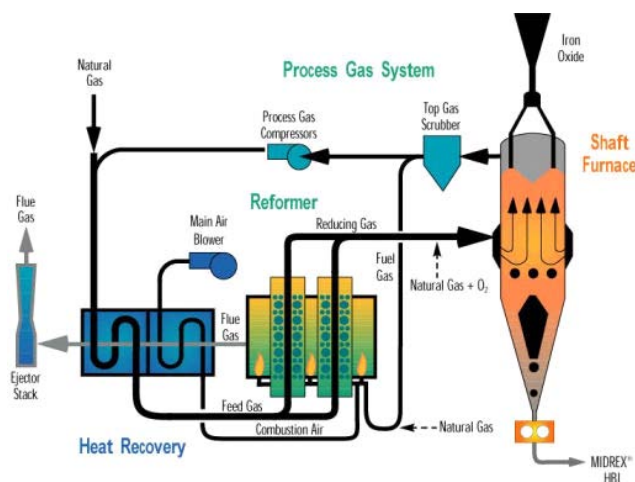
Le procédé Midrex (utilisé pour les 2/3 de la production de minerais pré-réduits) consiste à traiter, dans un four à cuve, à une température inférieure à 1100°C, le minerai par du gaz naturel réformé. Ce procédé consiste en trois étapes :

1- La Réduction : l'oxyde de fer sous forme brute ou de boulettes est introduit par le haut du fourneau. En même temps que le minerai descend dans le four sous l'effet de la gravité, il est chauffé par un flux gazeux ascendant en teneur élevée en H<sub>2</sub> et CO. Ces gaz réagissent avec l'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) pour le réduire dans un premier temps, puis le convertir en métal. Le fer réduit peut être extrait chaud du fourneau et introduit dans un four à arc électrique ou dans une machine à produire des briquettes. Il est également possible de carburer le fer réduit à froid. Pour ce faire, on insuffle un gaz froid par le bas du fourneau.

2- Le Reformage : pour optimiser l'efficacité du procédé, les gaz issus du fourneau (avec une forte proportion de CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O) sont recyclés et mélangés à du gaz naturel "frais". Le mélange est envoyé dans le réformateur (four à réverbère constitué de tubes en alliage remplis de catalyseur). La traversée de ces tubes va chauffer et réformer le mélange. A sa sortie, le gaz présentera une teneur d'environ 90%-92% de H<sub>2</sub> et de CO, il pourra alors être réutilisé directement dans le fourneau.

3- La Récupération de la chaleur : une partie de la chaleur peut être récupérée à partir de la fumée qui s'échappe du réformateur. Elle va servir à préchauffer trois types de gaz :

- le mélange de gaz d'alimentation,
- l'air de combustion du brûleur,
- le gaz naturel.



**Figure 16 : Schéma descriptif d'un procédé de réduction directe Midrex**

<sup>7</sup> Source : <http://unctad.org/infocomm/francais/fer/technologie.htm>



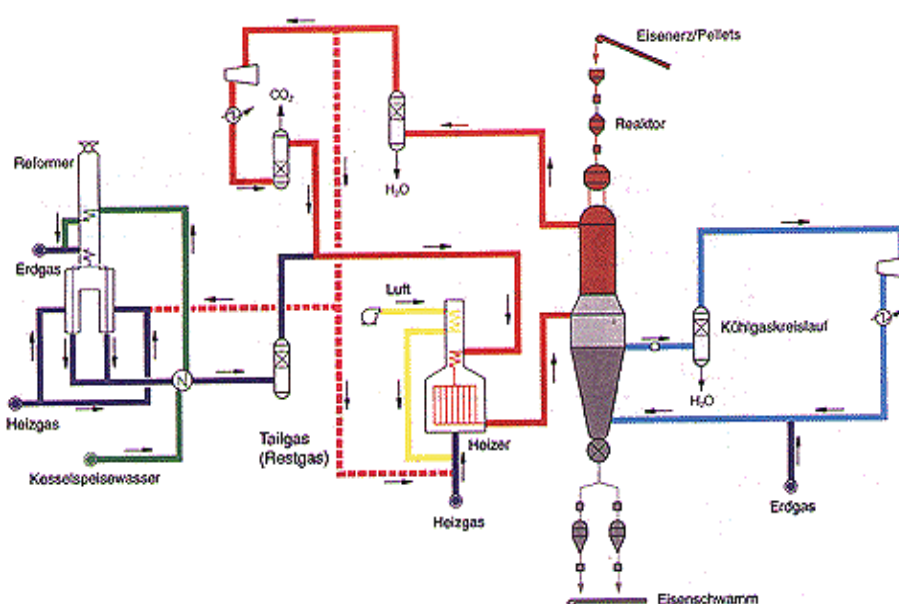
Nom de la Technologie		Midrex	Sources	Commentaires
Code TIMES		ISMDRXPRO		
Opérationnel		2005		
Matière	<u>Entrées</u>			
	Minerai de fer	1450 kg/t	ITM Sa	
Energie	Gaz Naturel		EIFER	ITM Sa estime 2907 kWh/t
	Electricité		BOC GASES	ITM Sa estime 120 kWh/t
<u>Sorties</u>				
DRI		1000 kg		
Coûts d'investissement			EIFER	
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>				
Coûts Fixes		7 €/t		
Coûts variables		3 €/t		
Durée de vie		25		

**Tableau 17 : Description d'un procédé Midrex (données techniques et économiques)**

### ➤ HYL III


Dans le procédé HYL-III, le gaz naturel est transformé en gaz de réduction dans un four à reformage, à l'aide d'un catalyseur et à des températures comprises entre 800 et 900 °C. La réduction s'effectue ensuite dans un four à cuve. Dans la partie supérieure du four, la réduction des boulettes par le gaz réducteur a lieu selon le principe du contre-courant.

Dans la partie inférieure, les éponges de fer sont refroidies environ 50 °C par un gaz de refroidissement, puis retirées au moyen d'un système d'écluses. En général, les éponges de fer subissent un traitement ultérieur dans un four électrique à arc.



**Figure 17 : Schéma descriptif d'un procédé de réduction directe HYLIII**

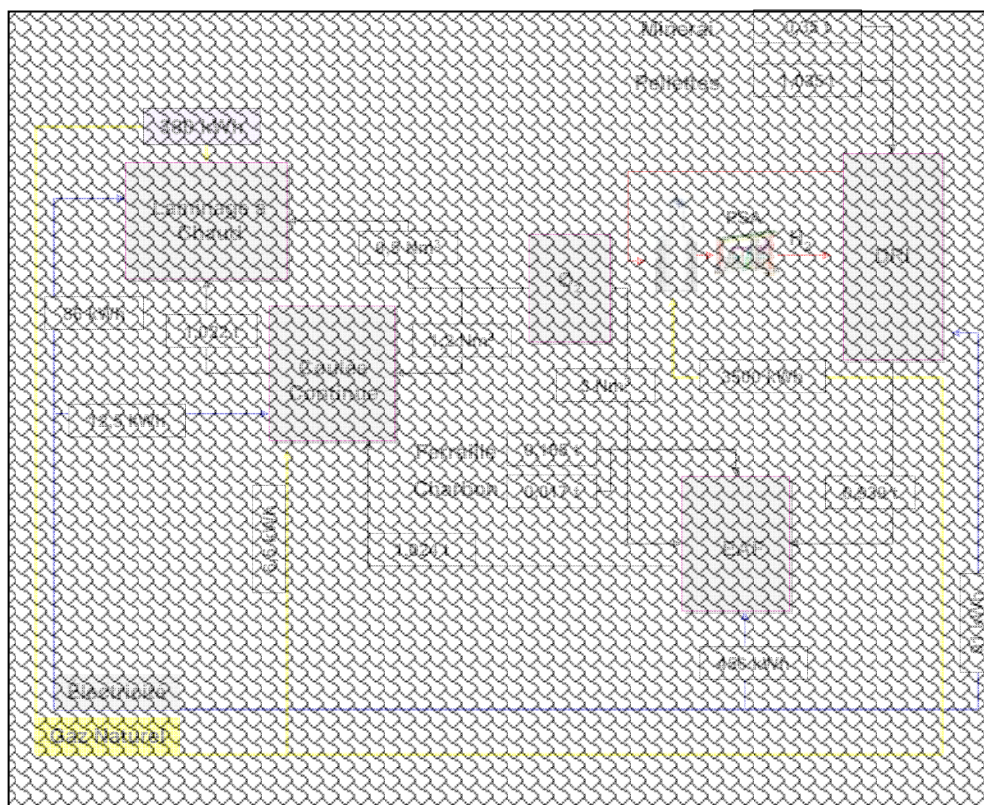


Nom de la Technologie		HYL III	Sources	Commentaires
Code TIMES		ISHYLPRO		
Opérationnel		2005	Hypothèse	
Matière	<u>Entrées</u>			
	Minerai de fer	1450 kg/t	ITM Sa	
Energie	Gaz Naturel		BOC GASES	EIFER estime 60 à 100 kWh/t
	Electricité		BOC GASES	
<u>Sorties</u>				
DRI		1000 kg		
Coûts d'investissement		190 €/t	ITM Sa	
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>				
Coûts Fixes		4,3 €/t	ITM Sa	
Coûts variables		4 €/t		
Durée de vie		25		

**Tableau 18 : Description d'un procédé HYLIII (données techniques et économiques)**

➤ Hydrogène avec reformage de la vapeur (Steam Reforming  $H_2$ )

Le procédé à hydrogène avec reformation de vapeur est un procédé de réduction directe (MIDREX) avec une installation de production d'hydrogène à base d'un mélange de gaz naturel et des gaz de procédé de réduction directe. L'hydrogène produit sert à la réduction du minerai de fer.

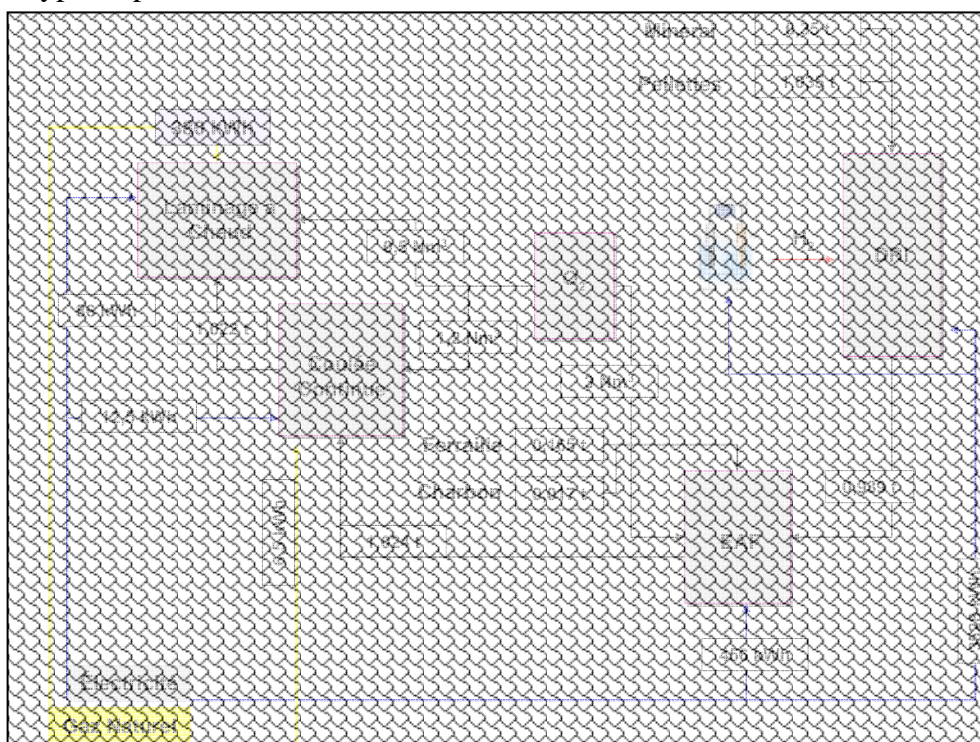


Nom de la Technologie	Steam Reforming Hydrogen	Sources
Code TIMES	ISDRISRHPRO	
Opérationnel	2015	
Coûts d'investissement		DOE H2A, MATTER, EIFER
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>		
Coûts Fixes		DOE H2A, MATTER, EIFER
Coûts variables		DOE H2A, MATTER, EIFER
Durée de vie	20	DOE H2A

**Tableau 19 : Description d'un procédé H<sub>2</sub> avec réformage de la vapeur (données techniques et économiques)**

➤ **Hydrogène avec électrolyse de l'eau (Electrolytic H<sub>2</sub>)**

Le procédé à hydrogène avec électrolyse de l'eau est la combinaison d'un procédé de réduction directe (MIDREX) avec une installation de production d'hydrogène à base de l'électrolyse de l'eau. Cette dernière produit l'hydrogène nécessaire pour la réduction du minerai. Ce type de procédé est fortement consommateur en électricité.



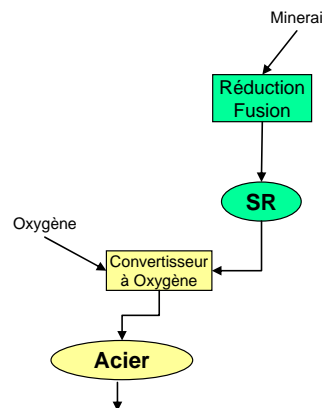
Nom de la Technologie	DRI Hydrogène Electrolytique		Sources
Code TIMES	ISELTHYDPRO		
Opérationnel	2015		
Coûts d'investissement			DOE H2A, MATTER, EIFER, HYWAYS
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>			-
Coûts Fixes			DOE H2A, MATTER, EIFER, HYWAYS
Coûts variables			DOE H2A, MATTER, EIFER, HYWAYS
Durée de vie	20		DOE H2A

**Tableau 20 : Description d'un procédé H<sub>2</sub> avec electrolyse de l'eau (données techniques et économiques)**

### 1.3.3.2. La Réduction Fusion (SR)

La réduction fusion (SR) consiste en la réduction du minerai de fer sans recours à la cokerie ou l'agglomération. L'intérêt derrière le développement de cette technique sont les faibles émissions de gaz à effet de serre essentiellement le CO<sub>2</sub> et les coûts réduits (investissement et coûts opératoires). Le principe derrière cette technique est que l'oxyde de fer est réduit à l'état liquide par le carbone ou l'oxyde de carbone. Les réactions produites à l'état liquide sont beaucoup plus rapides que les réactions produites à l'état solide. Puisque la réduction dans un haut fourneau est une réaction à l'état solide, le temps de réduction peut être réduit.

En principe, la réduction fusion peut consister en un seul réacteur dans lequel le minerai de fer non préparé et le charbon réagissent pour produire de l'acier. Cela signifie que la décarburation du minerai de fer a lieu dans le même réacteur.



#### ➤ Corex<sup>8</sup>

Le développement du procédé Corex remonte à 1980. Ce procédé a été mis au point par Voest-Alpine (Allemagne/Autriche) [de Beer, 2000].

Dans le cas de Corex, toutes les réactions métallurgiques se déroulent à l'intérieur de deux réacteurs séparés, la cuve de réduction et le réacteur de fusion-gazéification. Le charbon est acheminé directement dans le dôme du réacteur pour y être cokéfié à des températures entre 1000 et 1050°C. En outre, de l'oxygène est injecté dans le réacteur de fusion-gazéification où il réagit avec le charbon pour former un gaz réducteur de haute qualité. Une fois sorti du réacteur de fusion-gazéification, le gaz est refroidi pour atteindre la température que doit avoir le gaz réducteur (entre 800 et 850°C). Après son dépoussiérage dans un cyclone à gaz chaud, ce gaz est amené dans la cuve de réduction où un mélange de minerais en morceaux ou de pellets est transformé en « pré réduits ». Ces pré réduits sont acheminés dans le réacteur de fusion-gazéification pour y être fondus.

La procédure de coulée, la température de coulée ainsi que le traitement ultérieur de la fonte sont exactement les mêmes que pour la fonte de haut-fourneau. Les gaz d'exportation produits environnent 11,5 GJ/thm<sup>9</sup> [Puehringer, 1991]. Les investissements directs pour une capacité de 1,5 Mthm sont de 250\$/thm [Corex, 1996]. Le coût de production à la tonne d'un procédé Corex est inférieur de près de 20% par rapport à un haut fourneau [Corex, 1996]. De Beer estime que les coûts d'investissements sont inférieurs de 20% mais les coûts variables sont supérieurs ou au moins égaux à ceux d'un haut fourneau.

<sup>8</sup> Les sous-produits écologiquement indésirables tels que les goudrons, les phénols et les hydrocarbures sont dissociés immédiatement et ne sont donc pas rejetés hors du réacteur (le cas des cokeries).

<sup>9</sup> Tone of hot metal

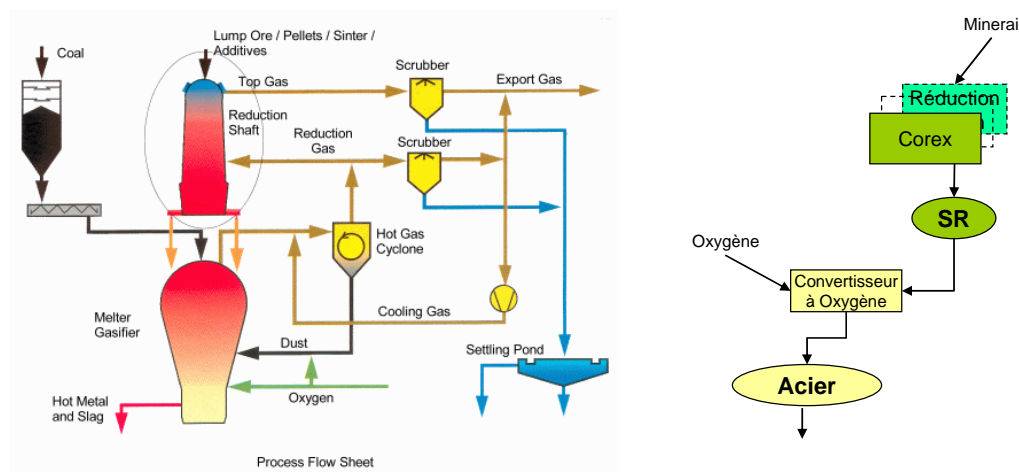


Figure 18 : Schéma descriptif d'un procédé de réduction fusion Corex

Nom de la Technologie		Corex	Sources	Commentaires
Code TIMES		ISCOREXPRO		Modifiable
Opérationnel		2005	Hypothèse	Modifiable
Matière	<u>Entrées</u>			
	Mineral de fer	340 kg/t	ITM Sa	Actualisée (de Beer estime 540 m <sup>3</sup> N)
	Pellet	400 kg/t	ITM Sa	
	Oxygène	526 m <sup>3</sup> N/t	BOC GASES	
Energie	Charbon	6,840 kWh/t	BOC GASES	
	Electricité	75 kWh/t	BOC GASES	
<u>Sorties</u>				
Fonte		1000 kg		
Coûts d'investissement		200 €/t	MATTER	de Beer estime US\$ 250/t
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>				
Coûts Fixes		10 €/t	MATTER	
Coûts variables		2 €/t	MATTER	
Durée de vie		25		

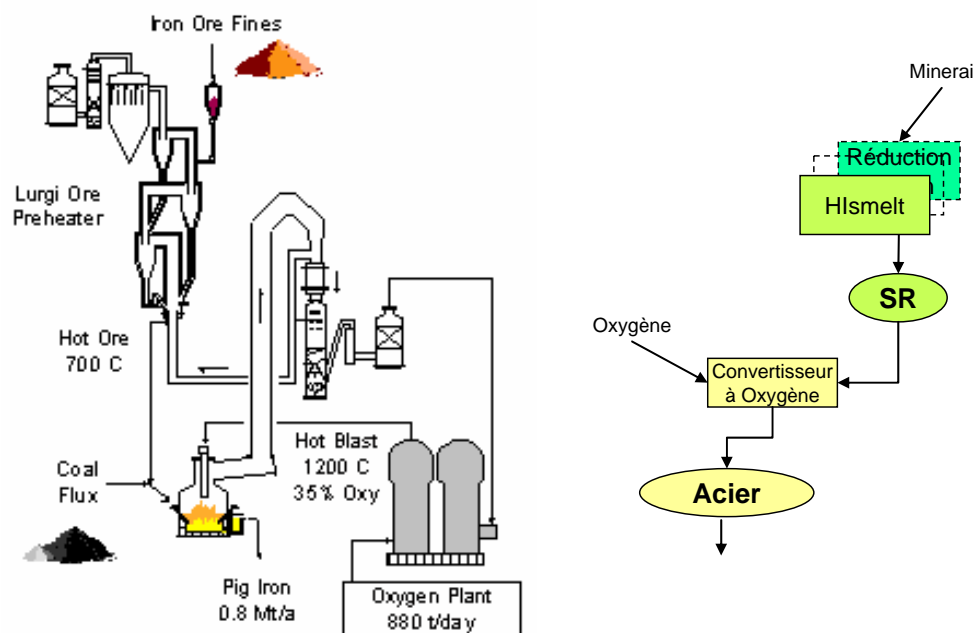
Tableau 21 : Description d'un procédé de réduction fusion Corex (données techniques et économiques)

### ➤ Hismelt

Le Hismelt (High Intensity smelting reduction) est issu de la coopération entre le CRA (Autriche) et le Klöckner werke (Allemagne) au début de 1980 [Millbank, 1995]. Le premier procédé commercial était programmé pour 1999 [Cusack et al., 1995]. La différence entre le procédé Hismelt et les autres procédés de réduction fusion, est que le Hismelt fonctionne à base de vent chaud sans oxygène pur [IISI, 1998]. L'avantage est que les coûts de production d'oxygène sont évités.

Le procédé Hismelt utilise une cuve cylindrique horizontale de réduction fusion où le charbon non cokéfié est injecté par le bas, alors que le minerai pré réduit et les vents chauds sont injectés par le haut. Le carbone se dissout dans le bain et réagit avec l'oxygène du minerai de fer, la chaleur issue est réutilisée dans le bain avec un système de transfert très efficace. L'axe de pré réduction est du type à lit fluidisé, facilitant le traitement des minerais fins. Les gaz chauds issus du cyclone d'épuration sont employés pour préchauffer l'air soufflé. Le coût

d'investissement moyen est de 200 US\$/thm. Les coûts variables annuels sont estimés à 80-95 US\$/thm. Les coûts de production totaux sont 100-120 US\$/thm, soit environ 20-25% inférieur que le haut fourneau.



**Figure 19 : Schéma descriptif d'un procédé de réduction fusion Hismelt**

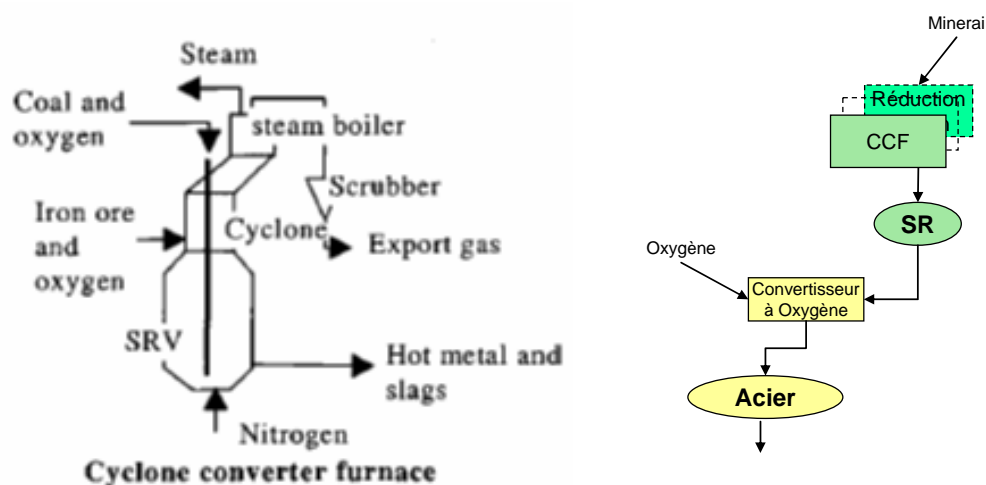
Nom de la Technologie		Hismelt Process	Sources	Commentaires
Code TIMES		ISHSMLTPRO		
Opérationnel		2005		
<b>Matière</b>	<u>Entrées</u> Minerai de fer	1450 kg/t		
<b>Energie</b>	Charbon Gaz Naturel Electricité	4500 kWh/t 194,6 kWh/t 60 kWh/t	BOC GASES de Beer, 2000 BOC GASES	
<u>Sorties</u>				
Fonte		1000 kg		
Coûts d'investissement		170 €/t	Prideaux, 1996	Projet de Rio Tinto d'un procédé Hismelt à Kwinan d'une capacité 0.8Mt pour un investissement de A166,4 M\$ (Soit US\$208/t). Prideaux, 1996, estime d'atteindre la cible de 200\$/t en 2010.
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>				
Coûts Fixes		10 €/t	Hypothèse	
Coûts variables		4 €/t	Hypothèse	
Durée de vie		25		

**Tableau 22 : Description d'un procédé de réduction fusion Hismelt (données techniques et économiques)**



➤ **CCF (Cyclone Converter Furnace)**

Le convertisseur cyclone (CCF) est un procédé de fusion-réduction développé par Hoogovens. British Steel et Ilva/CSM. Il se compose de deux étages assemblés en un seul réacteur : pré réduction et fusion du minerai dans un cyclone et réduction finale dans un bain métal-laitier.



**Figure 20 : Schéma descriptif d'un procédé de réduction fusion CCF**

Nom de la Technologie		Four à Convertisseur Cyclone	Sources	Commentaires
Code TIMES		ISCCFURPRO		
Opérationnel		2010	Hypothèse	
Matière	<u>Entrées</u>			
	Minerai de fer	1500 kg/t	ITM Sa	
	Chaux	110 kg/t	ITM Sa	
	Oxygène	600 m <sup>3</sup> N/t	BOC GASES	
Energie	Charbon	4480 kWh/t	BOC GASES	
	Electricité	70 kWh/t	BOC GASES	Actualisée. MATTER estime 1,3 GJ/t (360 kWh/t)
<u>Sorties</u>				
Fonte		1000 kg		
Coûts d'investissement		200 €/t	MATTER	Meijer et al, 1995 estime US\$180/t
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>				
Coûts Fixes		10	MATTER	
Coûts variables		5	MATTER	
Durée de vie		25		

**Tableau 23 : Description d'un procédé de réduction fusion CCF (données techniques et économiques)**

➤ **Electrolyse alcaline**

### Production de fer solide par électrolyse (basse température 100°C)



Nom de la Technologie	Alcaline Elctrolyse	Sources
Code TIMES	ISALKELYS PRO	
Opérationnel	2010	
Coûts d'investissement		ULCOS
<u>Coûts Opératoires et</u> <u>maintenance</u> Coûts Fixes Coûts variables		
Durée de vie	25	

**Tableau 24 : Description du procédé Alcaline Electrolyse (données techniques et économiques)**

### ➤ La pyroelectrolyse

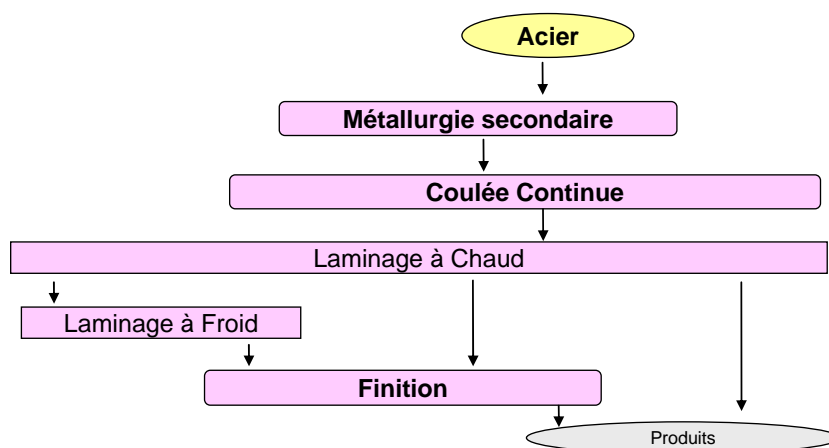
Production de fer liquide par électrolyse (haute température 1200°C)



Nom de la Technologie	Pyroelectrolyse	Sources
Code TIMES	ISPYRELYSPRO	
Opérationnel	2020	
Coûts d'investissement		ULCOS
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>		
Coûts Fixes		
Coûts variables		
Durée de vie	10	

**Tableau 25 : Description du procédé Pyroelectrolyse (données techniques et économiques)**

#### 1.3.4. Les Autres opérations de la Sidérurgie





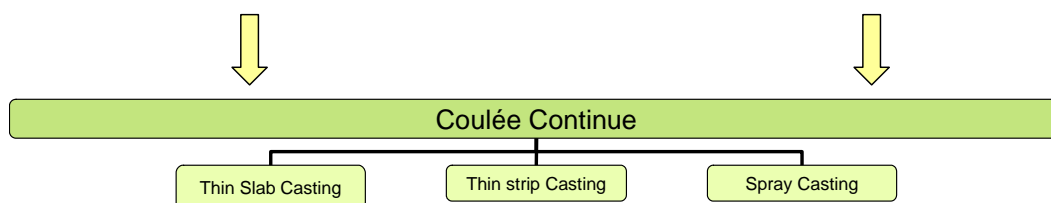
### ➤ La métallurgie secondaire

La métallurgie secondaire contient l'ensemble des opérations subies par l'acier entre la fin de l'affinage oxydant (convertisseur à oxygène ou four électrique) et la lingotière de coulée continue. Ce procédé consiste à ajuster la composition chimique de l'acier, à donner à l'acier sa pureté optimale et régler la température de l'acier.

Nom de la Technologie		Métallurgie secondaire	Source
Code TIMES		ISSCMETPRO	
Opérationnel		2005	
<b>Matière</b>	<u>Entrées</u>		
	Acier liquide		ULCOS
	Ferraille		ULCOS
	HP Oxygène		ULCOS
	Azote		ULCOS
<b>Energie</b>	Vapeur		ULCOS
	Gaz naturel		ULCOS
	Electricité		ULCOS
<u>Sorties</u>			
Acier liquide SM		1000 kg	
Ferraille		17,7 kg/t	
Coûts d'investissement			ULCOS
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>			
Coûts Fixes		4 €/t	
Coûts variables		1,2 €/t	
Durée de vie		25	

**Tableau 26 : Description de la métallurgie secondaire (données techniques et économiques)**

### ➤ La coulée



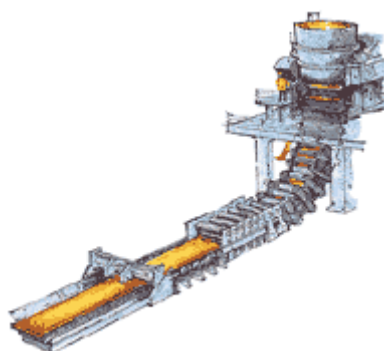
#### La coulée continue (CC)

Le principe de base de la coulée continue est de solidifier le métal liquide et d'assurer sa mise en forme. A l'aide d'une lingotière en cuivre de section carrée, rectangulaire ou ronde<sup>10</sup>, on fait couler l'acier liquide. Le métal commence à former une peau solide dans la lingotière violemment refroidie à l'eau. Tiré vers le bas par un jeu de rouleaux, il achève de se solidifier. A la base de l'installation, on extrait une barre solide, carrée, rectangulaire ou ronde, qui est découpée en tronçons de la longueur désirée.

<sup>10</sup> La forme de la lingotière dépend du semi-produit fabriqué

La solidification est une étape fondamentale de l'élaboration de l'acier, car toute imperfection serait irréversible et devrait être éliminée par enlèvement de matière.

Les demi-produits (brames, blooms, billettes) sont réchauffés dans des fours, avant de passer à l'étape suivante (laminage).



**Figure 21 : Schéma descriptif de la coulée continue**

Nom de la Technologie		Coulée Continue	Source
Code TIMES		ISSTLCCPRO	
Opérationnel		2005	
<b>Matière</b>	<u>Entrées</u>		
	Acier Liquide (issu de la Métallurgie Secondaire)		ULCOS
	Oxygène		ULCOS
	Azote		ULCOS
<b>Energie</b>	Gaz naturel		ULCOS
	Electricité		ULCOS
<u>Sorties</u>			
Acier		1000 kg	
Ferraille		12 kg	
Coûts d'investissement		90 €/t	
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>			
Coûts Fixes		7	
Coûts variables		2	
Durée de vie		25	

**Tableau 27 : Description de la coulée continue (données techniques et économiques)**

#### La coulée de brames minces (TSC)

La coulée de brames minces est l'extension directe de la coulée continue. L'idée derrière le développement de cette technologie est d'éliminer plusieurs étapes de production<sup>11</sup>, ce qui permettra de réduire les consommations énergétiques. En coulée continue conventionnelle pour produits plats, l'épaisseur des brames varie de 130 à 300 mm, alors que la coulée de brames minces permet d'atteindre des épaisseurs proches des produits finis (35 à 80 mm).

<sup>11</sup> La coulée continue conventionnelle mesure 800 mètres de long, alors que la coulée à brames minces ne fait que 260 mètres.

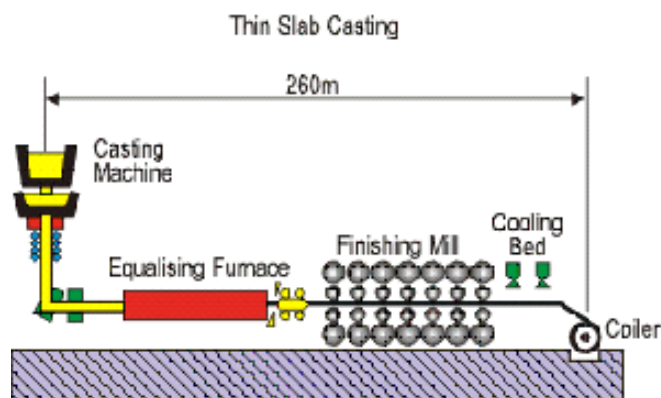


Figure 22 : Schéma descriptif de la coulée de brames minces

Nom de la Technologie		Coulée de brames minces	Source	Commentaires
Code TIMES		ISTSCSTLPRO		Modifiable
Opérationnel		2005		
Matière	<u>Entrées</u>			
	Acier Liquide SM		ULCOS	Ratios spécifiques à la coulée continue
	Oxygène Hp		ULCOS	
	Azote		ULCOS	
Energie				
	Electricité		ULCOS, ICARUS-4	ICARUS-4 estime une augmentation de 2.78 kWh/t. de Beer estime une augmentation de 90%.
<u>Sorties</u>				
Acier		1000 kg		
Ferraille		12 kg		
Coûts d'investissement		Supplément 40 €/t	ICARUS-4	
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>				de Beer estime une variation de - 10 à 10%.
Coûts Fixes		Supplément -0,08€/t	ICARUS-4	
Coûts variables		Supplément -0,08€/t	ICARUS-4	
Durée de vie		25		

Tableau 28 : Description de la coulée de brames minces (données techniques et économiques)

La coulée en bandes minces (SC)

La coulée en bandes minces permet de les fabriquer directement à partir du métal liquide et d'éliminer presque entièrement les étapes de laminage de l'acier. L'épaisseur du produit obtenu est de 1,5 à 20 mm [Farhi, TI].

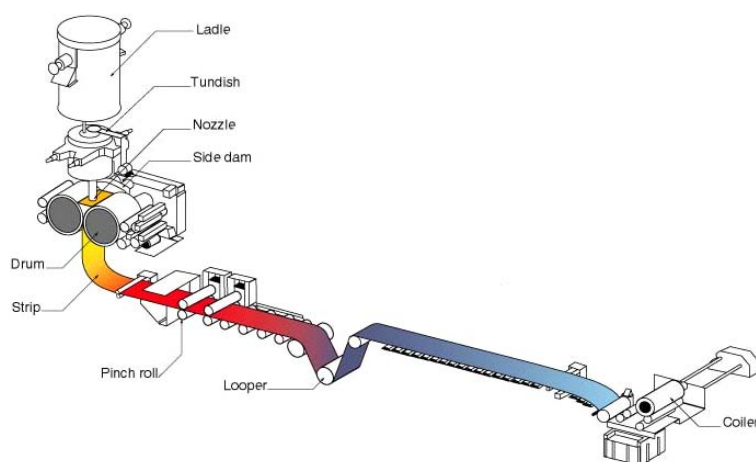


Figure 23 : Schéma descriptif de la coulée en bandes minces

Nom de la Technologie		Coulée de bandes minces	Source	Commentaires
Code TIMES		ISSCSTLPRO		
Opérationnel		2005		
Matière	<u>Entrées</u>			Ratios spécifiques à la coulée continue
	Acier Liquide SM		ULCOS	
	Oxygène		ULCOS	
	Azote		ULCOS	
Energie	Electricité	15 kWh/t		Aucune réduction n'est spécifiée dans ICARUS-4. de Beer estime - 75%.
<u>Sorties</u>				
Acier		1000 kg		
Ferraille		12 kg		
Coûts d'investissement		Supplément 14 €/t	ICARUS-4	
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>				Aucun supplément dans ICARUS-4. de Beer estime un supplément de 35 à 65%.
Coûts Fixes		Supplément 0%	ICARUS-4	
Coûts variables		Supplément 0%	ICARUS-4	
Durée de vie		25		

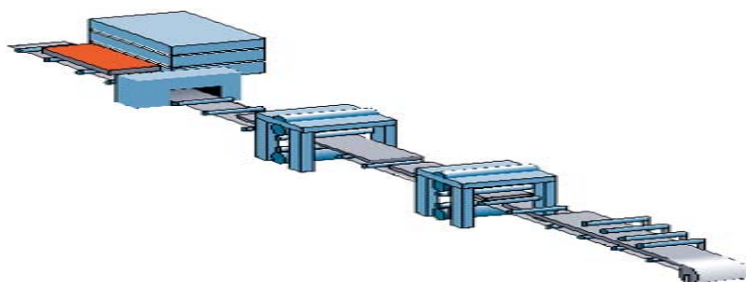
Tableau 29 : Description de la coulée en bandes minces (données techniques et économiques)

### ➤ Le laminage

#### Le laminage à chaud

Le laminage à chaud constitue l'étape ultime de fabrication après avoir obtenu à l'aciérie les demi-produits. Il transforme donc le demi-produit en produit fini par une réduction de section. Le demi-produit est engagé entre deux cylindres animés d'un mouvement de rotation inverse. Ce mouvement de rotation permet d'entraîner le produit par effet de frottement et de produire un écoulement vers l'avant en donnant un allongement, le métal est alors réduit en épaisseur. Par une succession de passage entre cylindres, le demi-produit est progressivement amené à

l'épaisseur du produit fini.



**Figure 24: Schéma descriptif d'un procédé de laminage à chaud**

Nom de la Technologie		Laminage à Chaud	Source
Code TIMES		ISHRNCPRO	
Opérationnel		2005	
<b>Matière</b>	<u>Entrées</u> Acier (semi produit)		ULCOS
<b>Energie</b>	Vapeur Gaz de cokerie Gaz de convertisseur Gaz de Haut Fourneau Gaz naturel Electricité		ULCOS    ULCOS ULCOS
<u>Sorties</u>			
Laminé à chaud		1000 kg	
Ferraille		10 kg/t	
Coûts d'investissement		100 €/t	
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>			
Coûts Fixes		7 €/t	
Coûts variables		2 €/t	
Durée de vie		25	

**Tableau 30: Description du laminage à chaud (données techniques et économiques)**

#### Laminage à chaud avec gaz naturel

Dans certaines filières de production d'acier (filière électrique) où la filière fonte est inexistante, les gaz sidérurgiques ne peuvent être utilisés comme combustibles dans le laminage à chaud. Par conséquent, les sidérurgistes ont recours au gaz naturel.

Nom de la Technologie	Laminage à Chaud	Source
Code TIMES	ISHRGNCPRO	
Opérationnel	2005	

<b>Matière</b>	<u>Entrées</u>		
	Acier (semi produit)		ULCOS
<b>Energie</b>	Vapeur		ULCOS
	Gaz naturel		
	Electricité		ULCOS
<u>Sorties</u>			
Laminé à chaud		1000 kg	
Ferraille		10 kg/t	
Coûts d'investissement		100 €/t	
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>			
Coûts Fixes		7 €/t	
Coûts variables		2 €/t	
Durée de vie		25	

**Tableau 31 : Description du laminage à chaud à base du gaz naturel (données techniques et économiques)**

#### Le laminage à froid

Le laminage à froid est généralement réservé aux produits plats (tôles d'acier). Il transforme un produit laminé à chaud en bobine de métal de fine épaisseur par le passage entre des cylindres très durs, en présence d'efforts élevés simultanément en pression et traction.

Le laminage à froid permet d'atteindre une épaisseur finale d'utilisation inaccessible par laminage à chaud, de fixer les caractéristiques mécaniques du produit et de donner l'aspect de surface final.

Nom de la Technologie		Laminage à froid	Source
Code TIMES		ISCRNCPRO	
Opérationnel		2005	
<b>Matière</b>	<u>Entrées</u>		
	Acier (semi produit)		ULCOS
<b>Energie</b>	Autres combustibles		EDF, Note France
	Gaz naturel		EDF, Note France
	Electricité		EDF, Note France
<u>Sorties</u>			
Laminé à froid		1000 kg	
Coûts d'investissement		100 €/t	non renseigné
<u>Coûts Opératoires et maintenance</u>			
Coûts Fixes		7 €/t	non renseigné
Coûts variables		2 €/t	non renseigné
Durée de vie		25	

**Tableau 32 : Description du laminage à froid (données techniques et économiques)**

## 1.4. Le Système Energétique de Référence (RES)

Dans un cadre global, notre étude se base sur le système énergétique de référence (RES) ci-dessous. Le système énergétique de référence est adapté de manière à donner une représentation claire cohérente avec une interaction de plusieurs paramètres techniques et économiques. La conception du RES a été fixée par l'intérêt accordé à chaque atelier en termes de consommation énergétique et d'émissions de CO<sub>2</sub>.

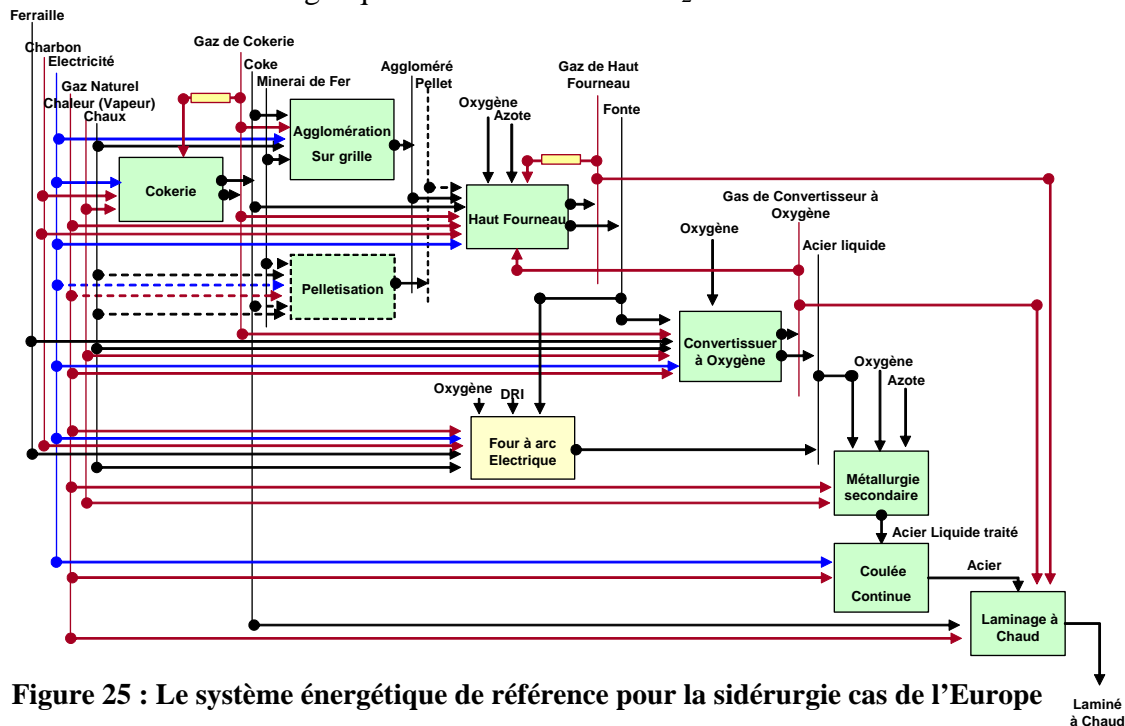


Figure 25 : Le système énergétique de référence pour la sidérurgie cas de l'Europe

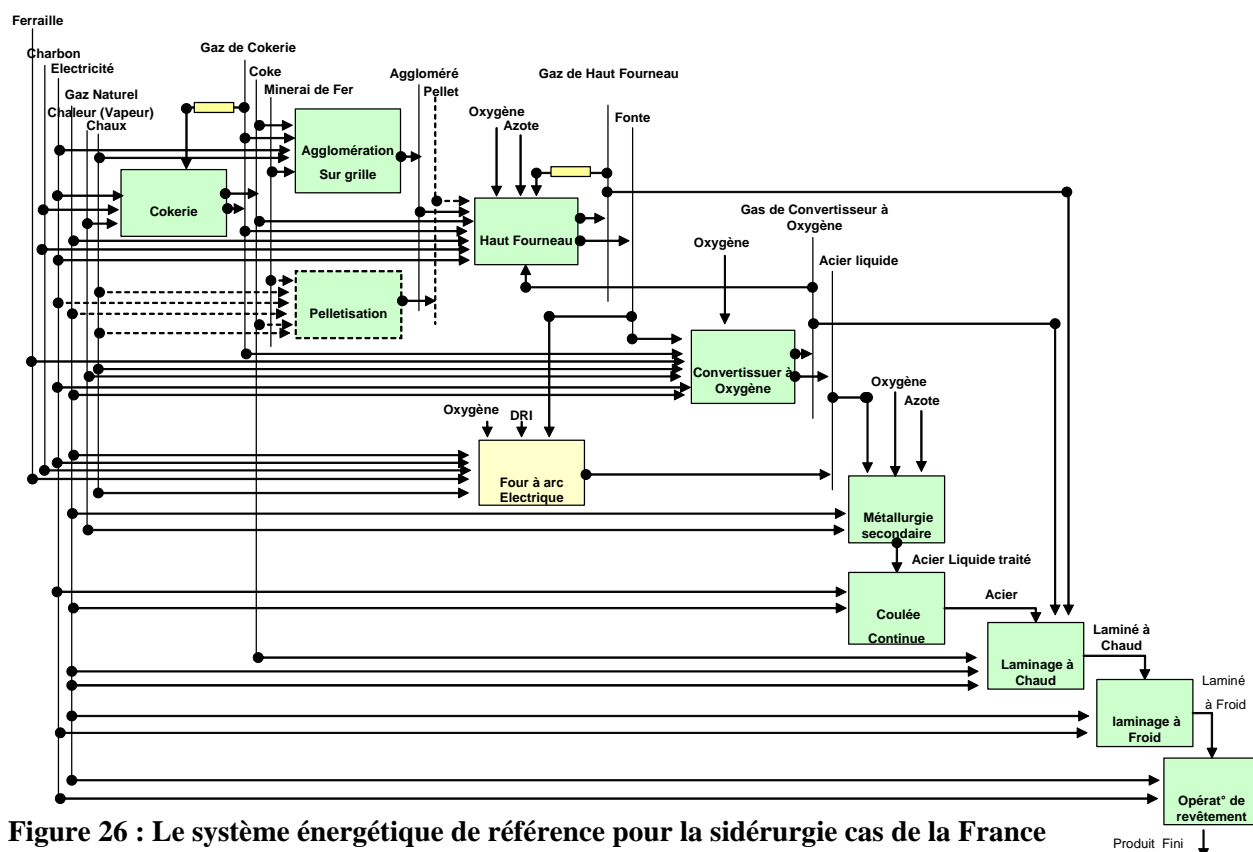


Figure 26 : Le système énergétique de référence pour la sidérurgie cas de la France

## 1.5. Sources et données Statistique

### 1.5.1. Les données de production cas de la France

Les données répertoriées ci-dessous concernent le secteur de la sidérurgie (271Z). Les données de production proviennent du SESSI, CEREN et de l'INSEE ou des organismes professionnels.

Procédé	Produit	Production
Agglomération	Aggloméré	18,118
Pelletisation	Pellets	0
Cokerie	Coke	3,546
Haut Fourneau	Fonte	12,972
Convertisseur à oxygène	Acier liquide	11,988
Four à arc électrique	Acier liquide	7,778
Réduction directe	DRI	0
Métallurgie secondaire	Acier de la métallurgie secondaire	19,766
Coulée continue	Blooms, brames, billettes	19,766
Laminage à chaud	Laminer	16,045
laminage à froid	Laminer	7,308
opérations de revêtement et finition	Acier fini	4,383

**Tableau 33 : production de la sidérurgie en Mt**



**1.5.2. Les données de production, cas de l'Europe<sup>12</sup>**

Pays	Procédé	Production (Mt)
Autriche	Cokerie	1,080
	Agglomération	5,700
	Fonte de haut fourneau	4,318
	Acier à l'oxygène	5,164
	Acier électrique	0,541
	Métallurgie secondaire	5,705
	Coulée Continue	5,007
	Acier laminé à chaud	5,035
Belgique	Cokerie	2,118
	Agglomération	11,182
	Fonte de haut fourneau	8,471
	Acier à l'oxygène	8,910
	Acier électrique	2,726
	Métallurgie secondaire	11,636
	Coulée Continue	13,614
	Acier laminé à chaud	13,689
Suisse	Cokerie	0,000
	Agglomération	0,000
	Fonte de haut fourneau	0,000
	Acier à l'oxygène	0,000
	Acier électrique	1,000
	Métallurgie secondaire	1,000
	Coulée Continue	0,995
	Acier laminé à chaud	1,000
Chypre	Cokerie	0,000
	Agglomération	0,000
	Fonte de haut fourneau	0,000
	Acier à l'oxygène	0,000
	Acier électrique	0,000
	Métallurgie secondaire	0,000
	Coulée Continue	0,000
	Acier laminé à chaud	0,000

<sup>12</sup> La valeur 0 est la valeur intégrée dans le modèle, elle exprime le manque de la donnée.

Pays	Produits	Production (Mt)
Répub-Tchèque	Cokerie	1,155
	Agglomération	6,100
	Fonte de haut fourneau	4,621
	Acier à l'oxygène	5,657
	Acier électrique	0,523
	Métallurgie secondaire	6,180
	Coulée Continue	4,521
	Acier laminé à chaud	4,546
Allemagne	Cokerie	7,711
	Agglomération	40,715
	Fonte de haut fourneau	30,845
	Acier à l'oxygène	33,052
	Acier électrique	13,324
	Métallurgie secondaire	46,376
	Coulée Continue	40,023
	Acier laminé à chaud	40,244
Danemark	Cokerie	0,000
	Agglomération	0,000
	Fonte de haut fourneau	0,000
	Acier à l'oxygène	0,000
	Acier électrique	0,800
	Métallurgie secondaire	0,800
	Coulée Continue	0,796
	Acier laminé à chaud	0,800
Estonie	Cokerie	0,000
	Agglomération	0,000
	Fonte de haut fourneau	0,000
	Acier à l'oxygène	0,000
	Acier électrique	0,000
	Métallurgie secondaire	0,000
	Coulée Continue	0,000
	Acier laminé à chaud	0,000

Pays	Produits	Production (Mt)
Espagne	Cokerie	1,015
	Agglomération	5,358
	Fonte de haut fourneau	4,059
	Acier à l'oxygène	4,216
	Acier électrique	11,628
	Métallurgie secondaire	15,844
	Coulée Continue	14,474
	Acier laminé à chaud	14,554
Finland	Cokerie	0,746
	Agglomération	3,938
	Fonte de haut fourneau	2,983
	Acier à l'oxygène	3,130
	Acier électrique	0,965
	Métallurgie secondaire	4,095
	Coulée Continue	4,068
	Acier laminé à chaud	4,090
Grèce	Cokerie	0,000
	Agglomération	0,000
	Fonte de haut fourneau	0,000
	Acier à l'oxygène	0,000
	Acier électrique	1,090
	Métallurgie secondaire	1,090
	Coulée Continue	1,094
	Acier laminé à chaud	1,100
Hongrie	Cokerie	0,335
	Agglomération	1,769
	Fonte de haut fourneau	1,340
	Acier à l'oxygène	1,638
	Acier électrique	0,233
	Métallurgie secondaire	1,871
	Coulée Continue	1,815
	Acier laminé à chaud	1,825

Pays	Produits	Production (Mt)
Irlande	Cokerie	0,000
	Agglomération	0,000
	Fonte de haut fourneau	0,000
	Acier à l'oxygène	0,000
	Acier électrique	0,360
	Métallurgie secondaire	0,360
	Coulée Continue	0,358
	Acier laminé à chaud	0,360
Islande	Cokerie	0,000
	Agglomération	0,000
	Fonte de haut fourneau	0,000
	Acier à l'oxygène	0,000
	Acier électrique	0,000
	Métallurgie secondaire	0,000
	Coulée Continue	0,000
	Acier laminé à chaud	0,000
Italie	Cokerie	2,806
	Agglomération	14,814
	Fonte de haut fourneau	11,223
	Acier à l'oxygène	10,676
	Acier électrique	16,045
	Métallurgie secondaire	26,721
	Coulée Continue	23,966
	Acier laminé à chaud	24,099
Lituanie	Cokerie	0,000
	Agglomération	0,000
	Fonte de haut fourneau	0,000
	Acier à l'oxygène	0,000
	Acier électrique	0,140
	Métallurgie secondaire	0,140
	Coulée Continue	0,139
	Acier laminé à chaud	0,140

Pays	Produits	Production (Mt)
Luxembourg	Cokerie	0,000
	Agglomération	0,000
	Fonte de haut fourneau	0,000
	Acier à l'oxygène	0,000
	Acier électrique	2,570
	Métallurgie secondaire	2,570
	Coulée Continue	2,566
	Acier laminé à chaud	2,580
Lettonie	Cokerie	0,000
	Agglomération	0,000
	Fonte de haut fourneau	0,000
	Acier à l'oxygène	0,000
	Acier électrique	0,000
	Métallurgie secondaire	0,000
	Coulée Continue	0,000
	Acier laminé à chaud	0,000
Malte	Cokerie	0,000
	Agglomération	0,000
	Fonte de haut fourneau	0,000
	Acier à l'oxygène	0,000
	Acier électrique	0,000
	Métallurgie secondaire	0,000
	Coulée Continue	0,000
	Acier laminé à chaud	0,000
Pays-Bas	Cokerie	1,243
	Agglomération	6,560
	Fonte de haut fourneau	4,970
	Acier à l'oxygène	5,507
	Acier électrique	0,159
	Métallurgie secondaire	5,666
	Coulée Continue	4,929
	Acier laminé à chaud	4,956

Pays	Produits	Production (Mt)
Norvège	Cokerie	0,000
	Agglomération	0,000
	Fonte de haut fourneau	0,000
	Acier à l'oxygène	0,000
	Acier électrique	0,675
	Métallurgie secondaire	0,675
	Coulée Continue	0,676
	Acier laminé à chaud	0,680
Pologne	Cokerie	1,626
	Agglomération	8,587
	Fonte de haut fourneau	6,505
	Acier à l'oxygène	3,290
	Acier électrique	3,332
	Métallurgie secondaire	6,622
	Coulée Continue	7,757
	Acier laminé à chaud	7,800
Portugal	Cokerie	0,095
	Agglomération	0,502
	Fonte de haut fourneau	0,380
	Acier à l'oxygène	0,410
	Acier électrique	0,630
	Métallurgie secondaire	1,040
	Coulée Continue	0,890
	Acier laminé à chaud	0,895
Roumanie	Cokerie	0,746
	Agglomération	3,940
	Fonte de haut fourneau	2,985
	Acier à l'oxygène	3,445
	Acier électrique	1,326
	Métallurgie secondaire	4,771
	Coulée Continue	3,133
	Acier laminé à chaud	3,150

Pays	Produits	Production (Mt)
Suède	Cokerie	0,786
	Agglomération	4,151
	Fonte de haut fourneau	3,145
	Acier à l'oxygène	3,235
	Acier électrique	1,992
	Métallurgie secondaire	5,227
	Coulée Continue	4,575
	Acier laminé à chaud	4,600
Slovénie	Cokerie	0,000
	Agglomération	0,000
	Fonte de haut fourneau	0,000
	Acier à l'oxygène	0,000
	Acier électrique	0,520
	Métallurgie secondaire	0,520
	Coulée Continue	0,418
	Acier laminé à chaud	0,420
Slovaquie	Cokerie	0,792
	Agglomération	4,179
	Fonte de haut fourneau	3,166
	Acier à l'oxygène	3,447
	Acier électrique	0,286
	Métallurgie secondaire	3,733
	Coulée Continue	3,371
	Acier laminé à chaud	3,390
Royaume-Uni	Cokerie	2,723
	Agglomération	14,375
	Fonte de haut fourneau	10,890
	Acier à l'oxygène	11,551
	Acier électrique	3,604
	Métallurgie secondaire	15,155
	Coulée Continue	12,931
	Acier laminé à chaud	13,003

### 1.5.3. Les consommations énergétiques

#### 1.5.3.1. Consommation de Combustibles par usage final le cas de la France

La consommation de combustibles du secteur de la sidérurgie s'élève à 66 700 GWh. Ce chiffre diffère de celui publié par le SESSI (73 047 GWh) pour plusieurs raisons :

- Le SESSI y inclut le coke de houille, les autres gaz de réseau, et le fioul domestique.
- Le CEREN tient compte des gaz sidérurgiques Consommés (gaz de haut fourneau, gaz de cokerie et gaz de convertisseur) : 4914 GWh consommés.

Lorsque les consommations d'un secteur NAF issues des enquêtes EMIE sont supérieures à celles publiées par le SESSI, le CEREN conserve la consommation issue de l'enquête,

Les achats de combustibles représentent environ 84% de l'ensemble de l'énergie consommée par l'industrie mais ont fortement diminué depuis 1999 (-8%, source SESSI).

Les principaux combustibles consommés sont les suivants :

- Le charbon, avec 52 837 GWh (66% de la consommation d'énergie de l'ensemble de l'industrie) est le combustible le plus utilisé ; il intervient principalement comme matière première dans les cokeries sidérurgiques, en sortie desquelles le gaz de cokerie est un coproduit énergétique, et également comme agent thermique dans les hauts fourneaux ; notons cependant que la consommation en charbon a fortement diminué depuis 1999 (où elle atteignait 63 723 GWh) du fait de la fermeture de cokeries intégrées.
- Le gaz naturel (8 576 GWh) ne représente que 10% de l'énergie consommée pour l'ensemble de l'industrie.
- Le coke (10 364 GWh, soit 13% de l'énergie consommée pour l'ensemble de l'industrie) est sujet aux mêmes remarques que le charbon. Le haut fourneau, principal utilisateur de coke, dégage également un coproduit énergétique, le gaz de haut fourneau. Notons que le coke consommé dépasse de très loin le coke acheté, car il est produit pour la plus grande part dans les cokeries sidérurgiques intégrées. Suite aux fermetures de cokeries intégrées, les achats de coke ont considérablement augmenté (+14% depuis 1999).
- Le fioul lourd (357 GWh, moins de 1% de la consommation de combustibles pour l'ensemble de l'industrie).

La figure ci-dessous (Figure 27) schématise les principales transformations de combustibles du secteur de la sidérurgie. Les données sont en GWh.



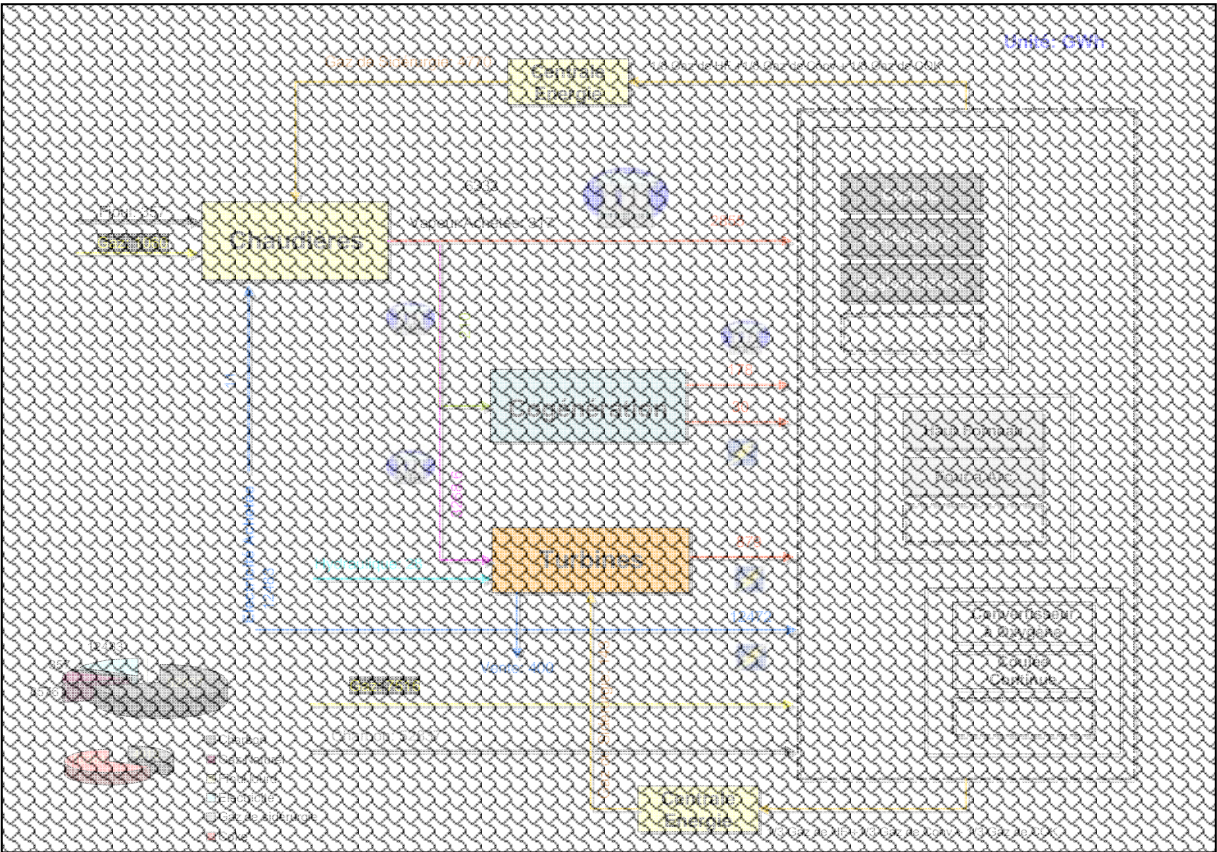


Figure 27 : répartition des consommations énergétiques dans la sidérurgie en France

1.5.4. Consommation énergétique des chaudières

Après répartition des consommations de combustibles sous chaudière, il apparaît que les gaz de sidérurgie et le gaz naturel représentent la plus grande part des énergies consommées (respectivement 77 et 17% du total des consommations sous chaudières et hors récupération). Le Fioul représente 6%. Les rendements associés aux chaudières sont les suivants : 95% pour le gaz naturel, 70% pour les gaz de sidérurgie et 92% pour le fioul.

Segment	Type	Nombre	Combustible	Consommation	Capacité Installéesr	Disponibilité	Rendement	Age (ans)
Sidérurgie (25) (271Z)	A tubes de fumée							
	A vaporisation instantanée							
	A tubes de fumée							
	A tubes d'eau							
	A vaporisation instantanée							
	De chauffage central							
	Autres							
	A tubes de fumée							
	Electrique							
	A tubes d'eau							
	à tubes de fumée							
	de récupération							
Total								

Source : CEREN

Tableau 34 : Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières

Segment	Mixtes				
	Type de chaudière	Gaz naturel	Autres gaz	FOL	Total
Sidérurgie (25) (271Z)	à tubes d'eau				
	à tubes de fumée				
	Total				

Source : CEREN

**Tableau 35 : Répartition des Mixtes en GWh**

### 1.5.5. Consommation Energétique des Turbines

Dans l'ensemble de la sidérurgie, les équipements de cogénération sont tous de type à contre-pression. La consommation de la cogénération représente 3% de l'ensemble de la vapeur issue des chaudières. L'ensemble de l'industrie de la sidérurgie compte dix turbines dont sept à vapeur (à condensation), une turbine hydraulique et deux turbines à base de gaz de sidérurgie. La production de l'ensemble de ces turbines est de 879 GWh soit 8% de l'ensemble de l'électricité achetée.

L'installation de cogénération à vapeur possède un rendement moyen global (électrique + thermique) de 99%. Par ailleurs, les turbines à vapeur et les turbines à gaz ont des rendements électriques respectivement de 27% et 44%.

Segment	Type	Nombre	Combustible	Energie en entrée	Capacité Installer	Electricité produite	Chaleur réccup	Disponibilité	Rendement	Age (ans)
Sidérurgie (25) (271Z)	Turbine Hydraulique									
	vapeur à condensation									
	vapeur à contrepression									
	Turbine de détente gaz									
Total										

Source : CEREN

**Tableau 36 : Consommation en GWh et puissance installée en MW des cogénérations et turbines**

Segment			Autres Gaz	Gaz Naturel	Fioul	Mixte	Electricité	Total
Sidérurgie (25) (271Z)	Fluide caloporteur							
	Fluide caloporteur							

Source : CEREN

**Tableau 37 : Répartition des fluides caloporteurs en GWh**

**1.5.6. Consommation de Combustibles par usage final le cas de l'Europe**

	Csgaz	CSe	CSc	Élec	Comb	gaz	gaz
	(kWh/t)	(kWh/t)	(kWh/t)	(GWh)	(GWh)	%	(GWh)
<b>Allemagne</b>							
fonte de haut fourneau	31	78	3 087	2 406	95 225	1%	952
acier à l'oxygène	0	49	-153	1 620	-5 073	0%	0
acier électrique	281	635	295	8 461	3 935	95%	3,738
acier laminé à chaud	427	124	431	4 990	17 361	99%	17,187
agglomération du minerai de fer	4	32	415	971	12 595	1%	126
<b>Belgique</b>							
fonte de haut fourneau	31	78	3 087	661	26 152	1%	262
acier à l'oxygène	0	49	-153	437	-1 368	0%	0
acier électrique	281	635	295	1 731	805	95%	765
acier laminé à chaud	427	124	431	1 697	5 905	99%	5,846
agglomération du minerai de fer	4	32	415	287	3 728	1%	37
<b>Pays-Bas</b>							
fonte de haut fourneau	31	78	3 087	388	15 343	1%	153
acier à l'oxygène	0	49	-153	270	-845	0%	0
acier électrique	281	635	295	101	47	95%	45
acier laminé à chaud	427	124	431	615	2 138	99%	2,117
agglomération du minerai de fer	4	32	415	122	1 584	1%	16
<b>Espagne</b>							
fonte de haut fourneau	31	78	3 087	317	12 531	1%	125
acier à l'oxygène	0	49	-153	207	-647	0%	0
acier électrique	236	635	295	7 384	3 434	80%	2,747
acier laminé à chaud	388	124	431	1 805	6 279	90%	5,651
agglomération du minerai de fer	4	32	415	187	2 421	1%	24
<b>Italie</b>							
fonte de haut fourneau	31	78	3 087	875	34 648	1%	346
acier à l'oxygène	0	49	-153	523	-1 639	0%	0
acier électrique	236	635	295	10 189	4 739	80%	3,791
acier laminé à chaud	388	124	431	2 988	10 396	90%	9,357
agglomération du minerai de fer	4	32	415	516	6 692	1%	67

<b>Royaume-Uni</b>							
fonte de haut fourneau	31	78	3 087	849	33 620	1%	336
acier à l'oxygène	0	49	-153	566	-1 773	0%	0
acier électrique	236	635	295	2 289	1 064	80%	852
acier laminé à chaud	388	124	431	1 612	5 609	90%	5,048
agglomération du minerai de fer	4	32	415	501	6 494	1%	65
<b>Portugal</b>							
fonte de haut fourneau	0	78	3 087	30	1 173	0%	0
acier à l'oxygène	0	49	-153	20	-63	0%	0
acier électrique	103	635	295	400	186	35%	65
acier laminé à chaud	151	124	431	111	386	35%	135
agglomération du minerai de fer	0	32	415	13	166	0%	0
<b>Autriche</b>							
fonte de haut fourneau	31	78	3 087	337	13 331	1%	133
acier à l'oxygène	0	49	-153	253	-793	0%	0
acier électrique	58	635	295	344	160	20%	31
acier laminé à chaud	384	124	431	624	2 172	89%	1,935
agglomération du minerai de fer	5	32	415	147	1,910	1%	24
<b>Total 9 Pays UE</b>							
fonte de haut fourneau	31	78	3 087	6 948	274 984	1%	2,738
acier à l'oxygène	0	49	-153	4 508	-14 121	0%	0
acier électrique	220	635	295	36 123	16 801	74%	12,508
acier laminé à chaud	403	124	431	16 610	57 785	93%	53,993
agglomération du minerai de fer	4	32	415	3 372	43 742	1%	463

	Csgaz	CSe	CSc	Élec	Comb	gaz	gaz
	(kWh/t)	(kWh/t)	(kWh/t)	(GWh)	(GWh)	%	(GWh)
<b>Hongrie</b>							
fonte de haut fourneau	31	78	3 087	105	4 137	1%	41
acier à l'oxygène	0	49	-153	80	-251	0%	0
acier électrique	58	635	295	148	69	20%	13
acier laminé à chaud	384	124	431	226	787	89%	701
agglomération du minerai de fer	5	32	415	42	540	1%	7
<b>Pologne</b>							
fonte de haut fourneau	31	78	3 087	507	20 083	1%	201
acier à l'oxygène	0	49	-153	161	-505	0%	0
acier électrique	58	635	295	2 116	984	20%	192

acier laminé à chaud	384	124	431	967	3 365	89%	2,998
agglomération du minerai de fer	5	32	415	259	3 354	1%	43
<b>Slovaquie</b>							
fonte de haut fourneau	31	78	3 087	247	9 774	1%	98
acier à l'oxygène	0	49	-153	169	-529	0%	0
acier électrique	148	635	295	182	84	50%	42
acier laminé à chaud	216	124	431	420	1 462	50%	731
agglomération du minerai de fer	0	32	415	0	0	1%	0
<b>République tchèque</b>							
fonte de haut fourneau	31	78	3 087	360	14 266	1%	143
acier à l'oxygène	0	49	-153	277	-868	0%	0
acier électrique	281	635	295	332	154	95%	147
acier laminé à chaud	427	124	431	564	1 961	99%	1,942
agglomération du minerai de fer	0	32	415	0	0	1%	0
<b>TOTAL 4 PECO</b>							
fonte de haut fourneau	31	78	3 087	1 219	48 260	1%	483
acier à l'oxygène	0	49	-153	688	-2 154	0%	0
acier électrique	90	635	295	2 777	1 292	31%	394
acier laminé à chaud	363	124	431	2 178	7 576	84%	6,372
agglomération du minerai de fer	5	32	415	300	3 893	1%	49

## Bibliographie

### [Astier, 2004]

Astier, J, et al., Réussir l'industrialisation des procédés innovants dans l'industrie métallurgique, Revue de métallurgie, 2004,

### [Ball, 2004]

Ball, M., et al., Development of Energy Consumption in the European Steel industry, European Institute for Energy Research, 2004,

### [BEMP, 1995]

Battelle Europe Multiclient Program, Emerging and developing Iron and Steel Making Processes For the Future, Innovation & Technology Management SA, A Battelle Affiliate Consultancy, Follow-UP, 1994-1995

### [Béranger, 1994]

Béranger, G, Henry, G, Sanz, G, Le livre de l'acier, Sollac, 1994,

### [Berger, 1995]

Berger, H, A., et al, Iron and Steel Engineer, 72, 1995,

### [Bethenod, 2007]

Bethenod C., Prévisions de consommation d'électricité et de gaz naturel pour la sidérurgie en France, 2007, rapport interne à EDF.

**[Birat, 2002]**

Birat, J, P., Innovation paradigms for the steel industry of the 21st Century, Future directions for steel industry and continuous casting, La revue de metallurgies, 2002,

**[BREF, 2001]**

Integrated Pollution Prevention and control (IPPC), Best Available Techniques Reference Document on the Production of iron and Steel, European Commission, Décembre 2001,

**[CEREN, 2003]**

Modèle de consommations d'énergie dans l'industrie en Europe, Etude Réalisée pour EDF, CEREN 2003.

**[CEREN, 2005]**

Le profil énergétique du secteur de la métallurgie, secteurs E15 – E16 – E17 – E18 – APE 275 ET 284A, enquête par enquêteurs, EMIE 2003, CEREN, 2005

**[Corex, 1996]**

Corex, Revolution in Ironmaking, Voest-Alpine Industrienanlagenbau, 1996

**[Cusack et al., 1995]**

Cusack, B,L., et al., Initial operation in HISmelt research and development Facility, Iron and steelmaker, 1995,

**[de Beer, 2000]**

J, de Beer, Potential for Industrial Energy Efficiency Improvement in the Long Term, Eco-Efficiency in Industry and Science, Kluwer Academic publishers, London, 2000,

**[de Quièvre court, 2005]**

de Quièvre court, B., , Tableau de Bord Energie de la FFA année 2004, Fédération Française de l'Acier, 2005

**[EI, 2000]**

Energetics, Incorporated, Energy and Environmental Profile of the U,S, Iron & Steel, U,S, Department of Energy Office of industrial Technologies, DOE/EE-0029, 2000,

**[Eurofer, 2005]**

European Confederation of Iron and Steel Industry, Annual Report, 2005,

**[Farhi, TI]**

Farhi, J., Coulée continue de brames minces, technique de l'ingénieur,

**[Handbook, 13<sup>th</sup> Ed]**

European Iron and Steel Works, 13 Editions,

**[Hidalgo, 2003]**

Hidalgo, I., Energy Consumption and CO2 Emissions from the World Iron and Steel Industry, Institute for prospective Technological Studies, 2003,

**[IISI, 1998]**

IISI, International Iron and Steel Institute, Energy use in the steel industry, 1998,

**[infoMil, 1997]**

Information centre for Environmental licensing, Dutch Notes on BAT for the production of primary Iron and Steel , Final report, prepared for the ministry of housing, spatial planning and environment, Directorate for air and Energy, Department of Industry, 1997,

**[M,K, Jaccard & Associates, 2004]**

Jaccard & Associates, M,K, Case Study on Fiscal Policy and Energy Efficiency, Baseline Study, The National Round Table on the Environment and the Economy, 2004,

**[Meijer et al., 1995]**

Meijer, H,K,A, et al., The Cyclone Converter Furnace – Recent developpement, la revue de metallurgie, 1995,

**[Michels, 2000]**

Michels, K., Sector study for The Iron and Steel Industry, Department of science, Technology and society Utrecht University, The Netherlands, 2000,

**[Millbank, 1995]**

Millbank, P, Direct route to iron Gathers Momentum, Metal Bulletin Monthly (Metal technology Supplement, 1995,

**[Moestad, 2003]**

Moestad, O., Environmental Policy in the Steel Industry : Using Economic Instruments, Organisation de Coopération et de développement économique, 2003,

**[Prideaux, 1996]**

Prideaux, R,N., The Hismelt Process ; Premium Grade Metallics for Assia, SEAISI 25th Anniversary Conference, Bangkok, 1996,

**[Puehringer, 1991]**

Puehringer, O, et al, Practical Experience with the C-Process and it potential for development, Eisen und Stahl 111, 1991,

**[Reichelt, 1996 ]**

Reichelt, W, et al., "Contiarc--A New Scrap Melting Technology", MPT International, 1996,

**[SESSI, 2005]**

Service des études et des statistiques industrielles, les consommations d'énergie dans l'industrie, Ministère de l'économie des finances et de l'industrie, 2004/2005,

**[Steffen, 2004]**

State of the art technology of direct and smelting reduction of iron ores, la revue de métallurgie, 2004,

**[Stubbles, 2000]**

Stubbles, J., Energy Use in the U,S, Steel Industry: An Historical Perspective and future opportunities, U,S, Department of Energy Office of Industrial Technologies, Washington, DC, 2000,

**[U,S DE, 2000]**

Energy and Environmental profile of the U,S Iron and Steel Industry, Energetics, Incorporated, U,S Department of Energy Office of Industrial technologies, 2000,

**[World Bank Group, 1998]**

Coke Manufacturing, Pollution Prevention and Abatement Handbook,, World Bank Group, 1998,

**[Worrell, 1999]**

Worrell, E, et al, Energy Efficiency and carbon Dioxide Emissions Reduction Opportunities in the U,S, Iron and steel Sector, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999,

**[Ybema et al., 1995]**

Ybema, J,R, Prospects for Energy Technologies in the Netherlands, Technology Characterisations and technology results, 1995,

---

## ***AVERTISSEMENT***

**Pour des raisons de confidentialité et de droit de reproduction de données technico-économiques, EDF R&D a souhaité masquer certaines données dans la présentation des secteurs industriels, en particulier les données CEREN, ULCOS et interne EDF.**

---

---

## ***ANNEXE III***

## ***LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION***

---



**TABLE DES MATIERES**

<b>1. LE CIMENT .....</b>	<b>317</b>
1.1. DESCRIPTION DU SECTEUR .....	317
1.1.1. <i>Le ciment en quelques chiffres</i> .....	317
1.1.2. <i>Description et procédés de fabrication</i> .....	318
1.2. LE SYSTEME ÉNERGETIQUE DE REFERENCE (RES) .....	324
1.3. LES DONNEES STATISTIQUES UTILISEES COMME ENTREES DU MODELE .....	326
1.3.1. <i>Les nouvelles technologies</i> .....	326
1.3.2. <i>Les données de production</i> .....	335
1.3.3. <i>Les consommations énergétiques</i> .....	337
<b>2. LA CHAUX.....</b>	<b>341</b>
2.1. DESCRIPTION ET PROCEDES DE FABRICATION.....	341
2.1.1. <i>Description</i> .....	341
2.1.2. <i>Procédés de fabrication</i> .....	342
2.2. LE SYSTEME ÉNERGETIQUE DE REFERENCE (RES) .....	346
2.3. LES DONNEES STATISTIQUES UTILISEES COMME ENTREES DU MODELE .....	347
2.3.1. <i>Les nouvelles technologies</i> .....	347
2.3.2. <i>Les données de production</i> .....	351
2.3.3. <i>Les consommations énergétiques</i> .....	353
<b>3. LE PLATRE .....</b>	<b>356</b>
3.1. DESCRIPTION ET PROCEDES DE FABRICATION.....	356
3.2. LE SYSTEME ÉNERGETIQUE DE REFERENCE (RES) .....	357
3.3. LES DONNEES STATISTIQUES UTILISEES COMME ENTREES DU MODELE .....	358
3.3.1. <i>Les nouvelles technologies</i> .....	358
3.3.2. <i>Les données de production</i> .....	358
3.3.3. <i>Les consommations énergétiques</i> .....	360
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>364</b>

**➤ TABLEAUX**

Tableau 1: Tableau récapitulatif des opérations de production de ciment .....	318
Tableau 2: Types de ciments .....	319
Tableau 3: Consommation énergétique par type de voie de production de ciment .....	320
Tableau 4: Améliorations globales pour l'industrie du ciment en France .....	335
Tableau 5: Production de l'industrie du ciment en France en Mt.....	335
Tableau 6: Production de l'industrie du ciment pour le reste de l'Europe en Mt.....	336
Tableau 7: Consommation en TWh par type de combustibles de l'industrie du ciment .....	337
Tableau 8: Consommation en TWh des spéciaux par type .....	338
Tableau 9: Consommation d'électricité par usage en TWh .....	338
Tableau 10: Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières .....	338
Tableau 11: Consommations énergétiques du reste des pays européens.....	339
Tableau 12: Caractéristiques de quelques types de fours à chaux .....	344
Tableau 13: Production de l'industrie de la chaux en France en Mt .....	351
Tableau 14: Production de l'industrie de la chaux pour le reste de l'Europe en Mt.....	353
Tableau 15: Consommation en TWh par type de combustibles de l'industrie de la chaux .....	353
Tableau 16: Consommation en TWh des spéciaux par type.....	354

Tableau 17: Consommation d'électricité par usage en TWh.....	354
Tableau 18: Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières .....	354
Tableau 19: Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières .....	354
Tableau 20: Consommations énergétiques du reste des pays européens.....	355
Tableau 21: Améliorations globales pour l'industrie du Plâtre en France .....	358
Tableau 22: Production de l'industrie du plâtre en France en Mt .....	358
Tableau 23: Production de l'industrie du plâtre pour le reste de l'Europe en Mt.....	360
Tableau 24: Consommation en TWh par type de combustibles de l'industrie du plâtre .....	360
Tableau 25: Consommation d'électricité par usage en TWh.....	361
Tableau 26: Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières .....	361
Tableau 27: Consommation en TWh par type de combustibles de l'industrie du plâtre pour construction .....	361
Tableau 28: Consommation d'électricité par usage en TWh.....	362
Tableau 29: Consommations énergétiques du reste des pays européens.....	363

### ➤ FIGURES

Figure 1: Production mondiale du ciment par région en 2007 ( <i>Source Cembureau</i> ) .....	317
Figure 2: Procédé de fabrication du ciment.....	321
Figure 3: Description du procédé de préparation de cru .....	322
Figure 4: Four rotatif pour la cuisson du clinker .....	322
Figure 5: Description du procédé de cuisson de clinker.....	323
Figure 6 : Exemple d'un broyeur à boulets .....	323
Figure 7: Description du procédé de broyage de ciment .....	324
Figure 8: Le système énergétique de référence pour l'industrie du ciment : cas de la France .....	325
Figure 9: Le système énergétique de référence pour l'industrie du ciment : cas de l'Europe .....	325
Figure 10: Données d'entrée d'un procédé de préparation de Cru avec une presse à haut rendement.....	326
Figure 11: Données d'entrée d'un procédé de préparation de Cru avec un classificateur à haut rendement .....	327
Figure 12: Données d'entrée d'un four à clinker (voie sèche) avec un système de contrôle et de gestion.....	328
Figure 13: Données d'entrée d'un four à clinker (voie sèche) avec un système de combustion amélioré .....	328
Figure 14: Données d'entrée d'un four à clinker (voie sèche) avec des moteurs à variation de vitesse.....	329
Figure 15: Donnée d'entrée d'un four à clinker (voie sèche) avec optimisation de la récupération de chaleur ...	329
Figure 16: Données d'entrée d'un four à clinker (voie sèche) avec séquestration et stockage de CO2 .....	330
Figure 17: Données d'entrée d'un four à clinker (voie sèche) avec préchauffeur multi étages.....	331
Figure 18: Données d'entrée d'un four à clinker (voie sèche) avec un préchauffeur précalcinateur .....	332
Figure 19: Données d'entrée d'un four à clinker Long (voie humide) transformé vers une voie sèche avec préchauffeur précalcinateur.....	332
Figure 20: Données d'entrée conversion d'un four à clinker voie humide vers une voie semi-sèche.....	333
Figure 21: Données d'entrée conversion d'un four à clinker voie humide vers une voie sèche.....	333
Figure 22: Données d'entrée d'un procédé de broyage de ciment avec une presse à haut rendement .....	334
Figure 23: Données d'entrée d'un procédé de préparation de Cru avec un classificateur à haut rendement .....	334
Figure 24: Répartition des consommations énergétiques par opération (hors chaudière) .....	337
Figure 25: Schéma descriptif du cycle de la chaux .....	341

Figure 26: Schéma descriptif du procédé de fabrication de la chaux .....	343
Figure 27: Données d'entrée du procédé de préparation du calcaire.....	343
Figure 28: Données d'entrée du four à chaux .....	344
Figure 29: Données d'entrée du procédé de broyage et d'extinction de la chaux vive .....	346
Figure 30: Le système énergétique de référence pour la chaux : cas de la France .....	346
Figure 31: Le système énergétique de référence pour la chaux : cas de l'Europe.....	347
Figure 32: Données d'entrée du procédé de préparation du calcaire avec concasseurs à haut rendement .....	347
Figure 33: Données d'entrée four vertical à alimentation mixte .....	348
Figure 34: Données d'entrée four vertical à double chambre inclinée .....	348
Figure 35: Données d'entrée four vertical à plusieurs chambres .....	349
Figure 36: Données d'entrée four vertical annulaire.....	350
Figure 37: Données d'entrée four vertical à cycles alternés.....	350
Figure 38: Données d'entrée four rotatif avec préchauffeur à cyclone .....	351
Figure 39: Données d'entrée concasseur à haut rendement.....	351
Figure 40: Répartition des consommations énergétiques par opération (hors chaudière) .....	353
Figure 41: Données d'entrée du procédé de préparation du gypse.....	356
Figure 42: Données d'entrée du procédé de production du semi-hydrate (four à broyeur).....	356
Figure 43: Données d'entrée du procédé de production du plâtre (malaxeur).....	357
Figure 44: Le système énergétique de référence pour la chaux : cas de la France .....	357
Figure 45: Le système énergétique de référence pour la chaux : cas de l'Europe.....	358
Figure 46: Répartition des consommations énergétiques par opération (hors chaudière) .....	360
Figure 47: Répartition des consommations énergétiques par opération (hors chaudière) .....	362

# 1. Le Ciment

De nombreux éléments relatifs à la description des nouvelles technologies de cette annexe proviennent directement du document de référence sur les meilleures techniques disponibles (BREF : Best REFERencies). Pour de plus amples informations nous vous invitons à vous rendre sur le site de l'INERIS : <http://www.ineris.fr/aida/>.

## 1.1. Description du secteur

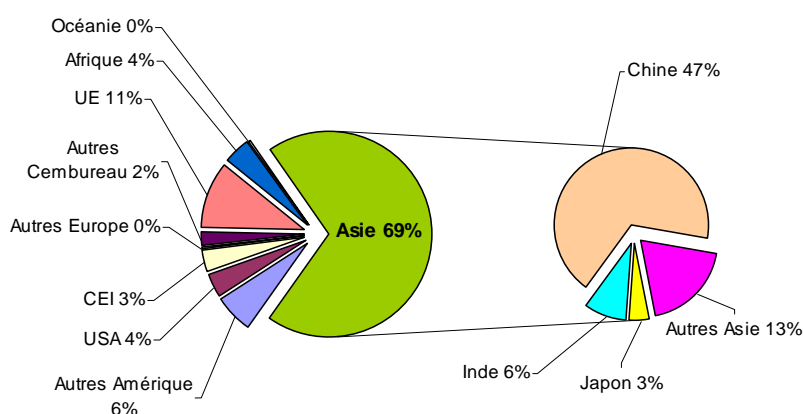
### 1.1.1. Le ciment en quelques chiffres<sup>1</sup>

En 2006, la consommation de ciment a poursuivi son expansion à l'échelle mondiale et la production de ciment a gagné quelque 12 %. Celle-ci a atteint 2,5 milliards de tonnes, après une hausse de 6 % déjà enregistrée en 2005.

C'est à nouveau l'Asie qui s'est montrée la plus dynamique, avec une augmentation de 14,7 %. La Chine, en particulier, a vu sa production croître de 19 % jusqu'à 1,24 milliard de tonnes. L'Inde s'est classée au deuxième rang des plus gros producteurs, avec 159 millions de tonnes, soit une croissance de quelques 11 %.

Sur le continent américain, la production de ciment s'est un peu essoufflée par rapport à 2005, puisqu'elle n'a augmenté que de 3%. Aux Etats-Unis la consommation stagne en 2006 avec une faible augmentation par rapport à 2005 soit 0,3%.

L'Europe dans son ensemble<sup>2</sup> représentait pratiquement 13 % de la production mondiale en 2006. La production européenne a augmenté de 7 % par rapport à l'année précédente. Les 27 États membres de l'Union européenne représentent 10,6 % de la production mondiale.



**Figure 1: Production mondiale du ciment par région en 2007** (Source Cembureau)

<sup>1</sup> Cette partie a été réalisée à partir des données statistiques du syndicat français de l'industrie cimentière pour la France ([www.infociments.fr](http://www.infociments.fr)) et le rapport d'activité du Cembureau ([www.cembureau.be/](http://www.cembureau.be/)) pour le reste du monde.

<sup>2</sup> Hormis les pays de la C.E.I (Communauté des États Indépendants, née en décembre 1991 et qui rassemble douze des quinze républiques de l'ex-URSS).

L'industrie cimentière française, avec 22 millions de tonnes de ciment produites pour l'année 2006 [Infociments, 2007] est la quatrième productrice de l'union européenne en volume et se trouve au dix-huitième rang au niveau mondial. Les exportations en France s'établissent à 1 Mt pour le ciment et 0,27 Mt pour le clinker, soit respectivement une baisse de 13% et 55% par rapport au niveau de 2005. Les importations du ciment et de clinker connaissent un net rebond en 2006 soit pour le ciment 2,8 Mt contre 2,6 Mt en 2005 et pour le clinker 0,3 Mt contre 0,246.

### 1.1.2. Description et procédés de fabrication

La préparation du cru	la production du clinker	la fabrication du ciment
<p><b>Concassage</b></p> <p>Les matières premières sont concassées à une finesse donnée.</p> <p><b>Stockage intermédiaire et préhomogénéisation</b></p> <p>Les matières premières sont stockées ou mélangées dans l'atelier de préhomogénéisation.</p> <p><b>Dosage</b></p> <p>Le dosage assure l'alimentation correcte du broyeur en quantité et composition.</p> <p><b>Broyage</b></p> <p>Dans le broyeur, les matières premières sont réduites à la finesse voulue et éventuellement séchées.</p> <p><b>Homogénéisation</b></p> <p>La farine est homogénéisée et stockée dans des silos, avant d'être dosée pour l'alimentation du préchauffeur.</p>	<p><b>Préchauffage et décarbonatation</b></p> <p>Le préchauffage et la décarbonatation de la farine s'effectuent dans un préchauffeur à cyclones équipé d'un précalcinateur.</p> <p><b>Cuisson</b></p> <p>La farine cuit dans le four rotatif où elle se transforme à environ 1.500° C en clinker.</p> <p><b>Refroidissement</b></p> <p>La chaleur libérée par le refroidissement du clinker est en grande partie récupérée.</p>	<p><b>Stockage</b></p> <p>Le stock de clinker assure l'autonomie de l'atelier de broyage du ciment.</p> <p><b>Broyage</b></p> <p>Suivant la qualité du ciment requise, divers produits sont additionnés au clinker.</p> <p><b>Stockage, conditionnement et chargement</b></p> <p>Le ciment est transporté jusqu'aux silos de stockage. Le chargement et l'expédition se font en citernes ou en sacs.</p>

Réalisé à partir de Polysius Ciment.

**Tableau 1: Tableau récapitulatif des opérations de production de ciment**

#### 1.1.2.1. Description

Le ciment est un matériau de construction conditionné sous forme de poudre finement broyée qui, une fois mélangée avec une adjonction d'eau, forme une pâte qui prend et durcit, il est utilisé comme matière première pour la fabrication du béton<sup>3</sup>. Le constituant principal des ciments est le clinker qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion moyenne de 80% pour le calcaire et 20% pour l'argile.

Il existe cinq différents types de ciments caractérisés par la nature et les proportions des constituants (Tableau 2).

<sup>3</sup> Un mélange de ciment, de granulats, de sable et d'eau

Chaque type de ciment correspond à un usage différent. Dans l'ensemble des types on s'intéresse uniquement aux ciments portland qui représentent généralement plus de 80% de la production totale de ciment.

Types de ciments	Compositions	Domaine d'utilisation
Ciment Portland	95% de clinker et 5% de constituants secondaires	Pour la confection de béton armés ou précontraints et pour les ouvrages dont le parement reste apparent et nécessite des caractéristiques mécaniques élevées
Ciment portland composé	65% de clinker et 35% de constituants secondaires	Pour les travaux courants en béton armé
Ciment de haut fourneau	20 à 64% de clinker et 36 à 80% de laitier	Pour les travaux souterrains ou en milieu agressif
Ciment pouzzolanique	45 à 90% de clinker et 10 à 55% de (pouzzolane <sup>4</sup> , cendres volantes, fumées de silice)	Pour le béton armé dans les travaux maritimes
Ciment de laitier et aux cendres	20 à 64% de clinker, 18 à 55% de laitier et 18 à 50% de cendres volantes	Pour les bétons utilisés en milieu agressif

Réalisé à partir de la fiche sectorielle fabrication de ciment [Hauser, 2006]

**Tableau 2: Types de ciments**

#### 1.1.2.2. Procédés de fabrication<sup>5</sup>

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes :

- préparation du cru,
- cuisson,
- broyage et conditionnement.

La réaction chimique de base de la fabrication du ciment commence avec la décomposition du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) en chaux (oxyde de calcium,  $\text{CaO}$ ) accompagnée d'un dégagement de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ), à environ 900°C. Ce processus appelé calcination est suivi de la cuisson du clinker ou clinkérisation pendant laquelle l'oxyde de calcium réagit à haute température (en général entre 1 400 et 1 500°C) avec la silice, l'alumine et l'oxyde ferreux pour former des silico-aluminates de calcium composant le clinker. Celui-ci est ensuite broyé et mélangé à du gypse et à d'autres constituants (laitiers du haut fourneau, cendres) ce qui permet d'obtenir le ciment.

<sup>4</sup> Schiste calciné

<sup>5</sup> Pour plus de détail : [http://aida.ineris.fr/bref/bref\\_ciment/site/pages/francais/bref\\_ciment\\_1\\_2.htm](http://aida.ineris.fr/bref/bref_ciment/site/pages/francais/bref_ciment_1_2.htm)

Il existe quatre grands procédés de fabrication du ciment: la voie sèche<sup>6</sup>, semi-sèche, semi-humide et humide [Navaro, 2004].

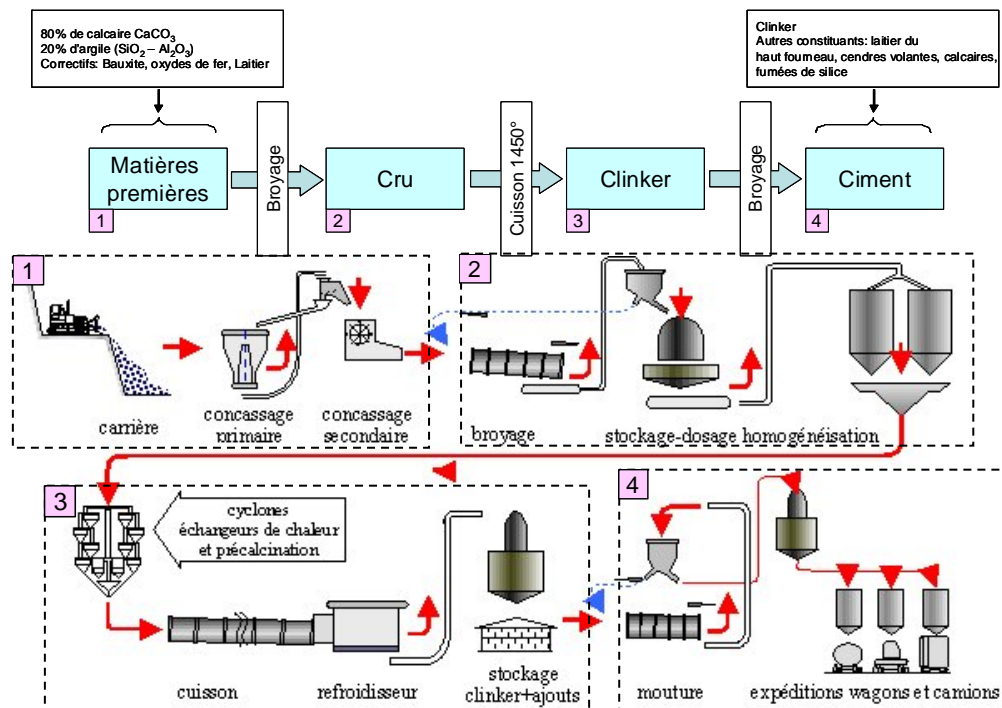
- Dans la **voie sèche**, les matières premières broyées et séchées forment le cru ou farine qui a l'aspect d'une poudre fluide. Le cru est ensuite introduit dans le préchauffeur ou le précalcinateur du four ou plus rarement, dans un four tubulaire long en voie sèche.
- Dans la **voie semi-sèche**, la farine mélangée à de l'eau forme des granules qui sont introduits dans un préchauffeur à grilles situé en amont du four ou dans un four long équipé de croisillons.
- Dans la **voie semi-humide**, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres-presses. Le gâteau de filtre-pressé est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru.
- Dans la **voie humide**, les matières premières (dont la teneur en humidité est souvent élevée) sont broyées dans l'eau pour former une pâte pouvant être pompée. Elle est ensuite introduite directement dans le four ou peut passer auparavant dans un sécheur.

	Voie sèche	Voie semi-sèche	Voie semi-humide	Voie humide
Consommation d'électricité (kWh/t)				
Consommation de combustibles (kWh/t)				

Source : CEREN, 2000

**Tableau 3: Consommation énergétique par type de voie de production de ciment**

<sup>6</sup> Représente 95% des voies de production de ciment. Plus de 75% en moyenne en Europe.



**Figure 2: Procédé de fabrication du ciment**

Le choix du procédé dépend dans une large mesure de l'état des matières premières (sèches ou humides). Une grande partie de la production mondiale de clinker est toujours fabriquée par voie humide. Cependant, en Europe, plus de 75 % [BREF, 2001] de la production de ciment est fabriquée par voie sèche en raison de la disponibilité des matières premières sèches. Les usines utilisant la voie humide ou semi-humide n'ont accès qu'à des matières premières humides, comme c'est le cas au Danemark et en Belgique et dans une certaine mesure, en Grande-Bretagne [BREF, 2001].

### Préparation du cru

La presque totalité des matières premières est extraite dans des mines ou des carrières, généralement à ciel ouvert. Le carbonate de calcium est fourni par les gisements de calcaire naturels. La silice, l'oxyde de fer et l'alumine sont présents dans différents minerais et minéraux comme le sable, les schistes argileux, l'argile et le minerai de fer. Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière par abattage à explosif ou à la pelle mécanique ou encore par le forage ou l'excavation. La préparation des matières premières est une étape très importante car elle garantit un ciment de qualité constante.

Les matières premières doivent être soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps. Le calcaire et l'argile sont ainsi intimement mélangés et broyés, dans des proportions définies, pour obtenir une poudre très fine qui est le cru. Dans la voie sèche et semi-sèche, elles sont broyées en poudre fine et séchées principalement à l'aide des gaz chauds du four et/ou de l'air d'exhaure du refroidisseur. Le broyage humide est réservé à la voie humide ou semi-humide.

Le pesage et le dosage peut varier d'une cimenterie à l'autre (en fonction de la qualité des gisements exploités) mais les proportions du cru restent bien définies [Jaume, 2004] :

- Carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), de 77 à 83%,
- Silice ( $\text{SiO}_2$ ), de 13 à 14%,



- L'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), de 2 à 4%,
- Oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), de 1,5 à 3%.

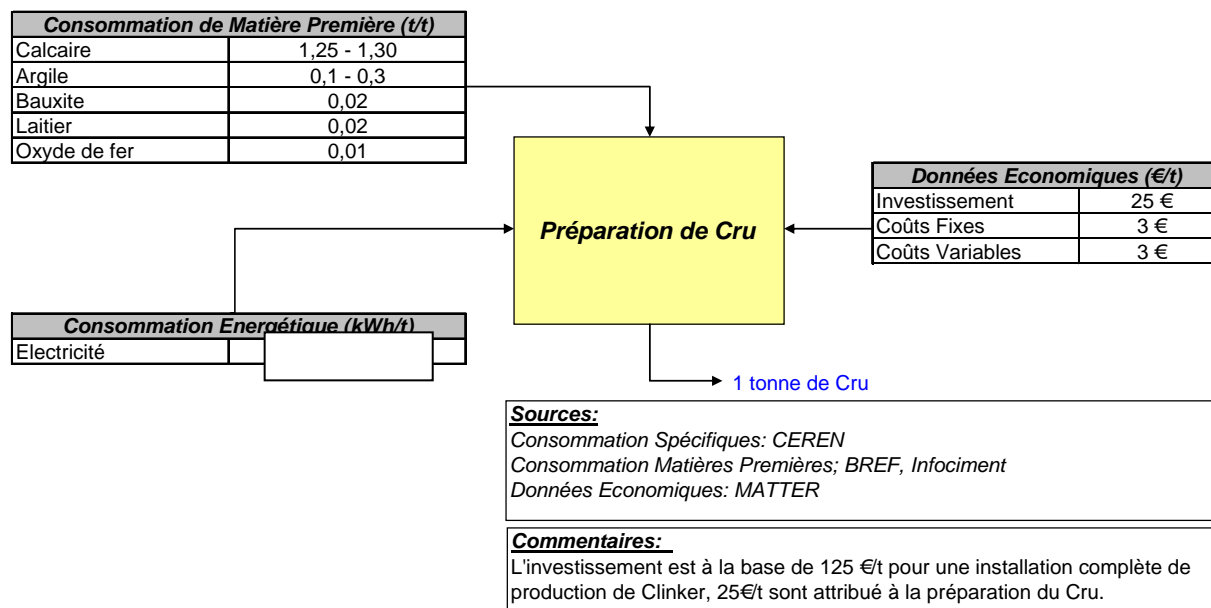


Figure 3: Description du procédé de préparation de cru

### Cuisson du clinker

La cuisson du clinker est l'étape intermédiaire des trois étapes du processus de fabrication du ciment. Il s'agit de l'opération la plus importante du procédé de fabrication en termes : de consommations énergétiques, de potentiel d'émissions, de qualité et de coût du produit. Dans une approche systématique, le cru (ou la pâte pour la voie humide) est introduit dans le four, et par traitement thermique, il est séché, décarbonaté et clinkérisé pour donner le clinker, lequel est refroidi par de l'air avant d'être stocké.

Pendant la cuisson du clinker, la température de la charge du four doit impérativement être maintenue entre 1 400 et 1 500°C.

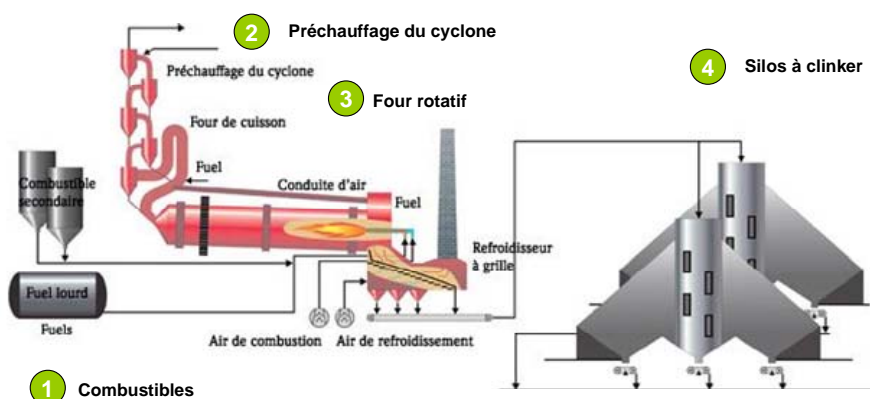


Figure 4: Four rotatif pour la cuisson du clinker

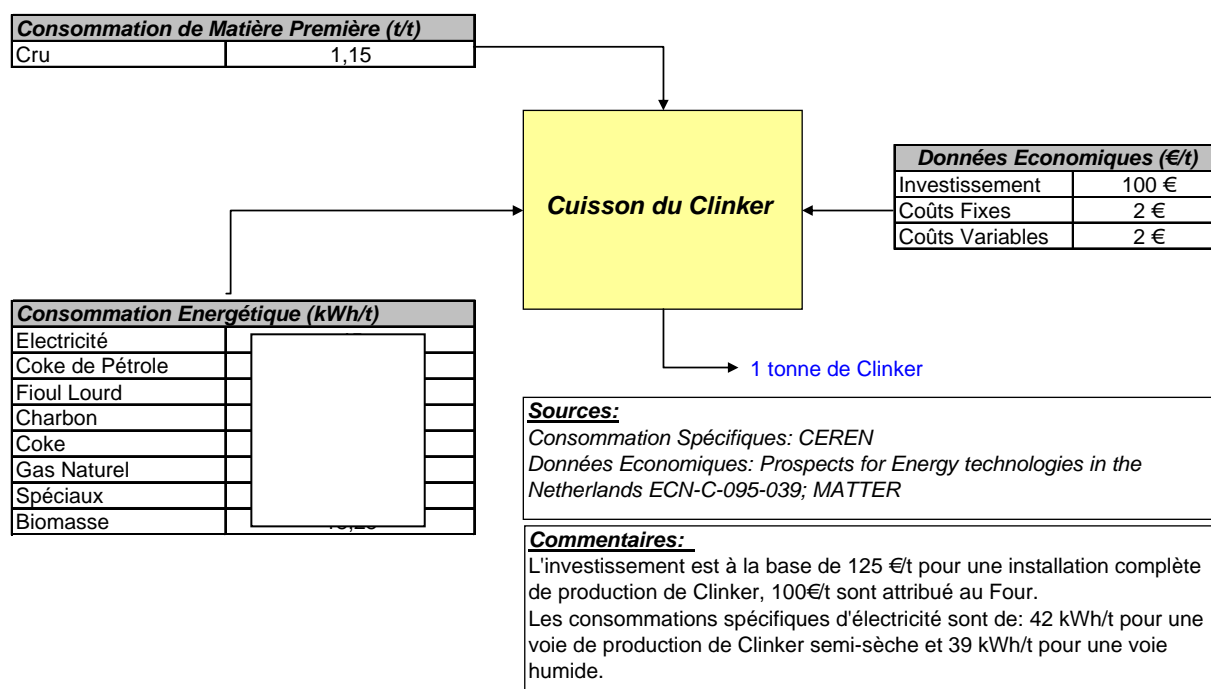


Figure 5: Description du procédé de cuisson de clinker

### Broyage du clinker

Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker doit être à son tour broyé très finement. Ce broyage<sup>7</sup> est en général effectué dans un broyeur à boulets, constitués de tubes blindés remplis de boulets en acier trempé qui, par choc, font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine. Les tubes blindés sont entraînés par des moteurs électriques. Le broyage procède donc par fragmentations successives des grains pour augmenter la réactivité du clinker en augmentant la surface de contact.

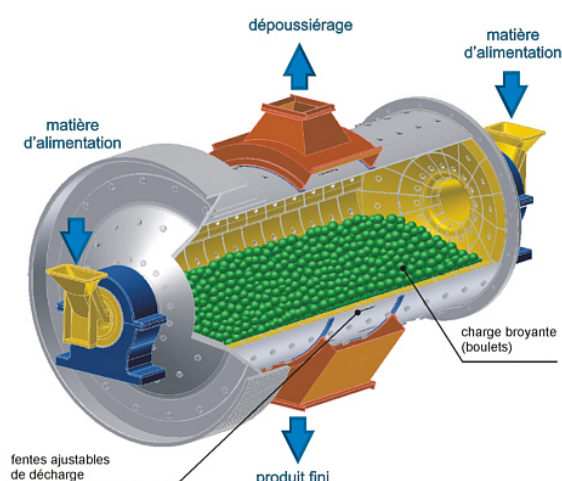


Figure 6 : Exemple d'un broyeur à boulets

<sup>7</sup> Les stations de broyage peuvent être implantées ailleurs que sur le site de production du clinker

C'est également lors du broyage que l'on ajoute au clinker le gypse (3 à 5%) [Calcia, 2006] indispensable à la régulation de prise du ciment. On obtient alors le ciment "Portland". Les ciments "à ajouts" sont obtenus par l'addition au clinker, lors de son broyage, d'éléments minéraux supplémentaires contenus par exemple dans les laitiers de hauts fourneaux, les cendres de centrales thermiques, les fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles ou artificielles. Ainsi sont obtenues les différentes catégories de ciments qui permettront la réalisation d'ouvrages allant du plus courant au plus exigeant. Le type de ciment à fabriquer détermine le choix du procédé et celui de l'installation de broyage. L'aptitude au broyage, l'humidité et le comportement à l'abrasion des constituants du type de ciment fabriqué sont tous particulièrement importants.

Acheminés vers les silos de stockage par transport pneumatique ou mécanique, les ciments quittent l'usine en sacs ou en vrac. Les sacs sont acheminés vers des palettiseurs qui constituent des palettes transportées par camion. Le ciment livré en vrac constitue 70% de la production. Il est transporté par camion-citerne, par train ou par bateau.

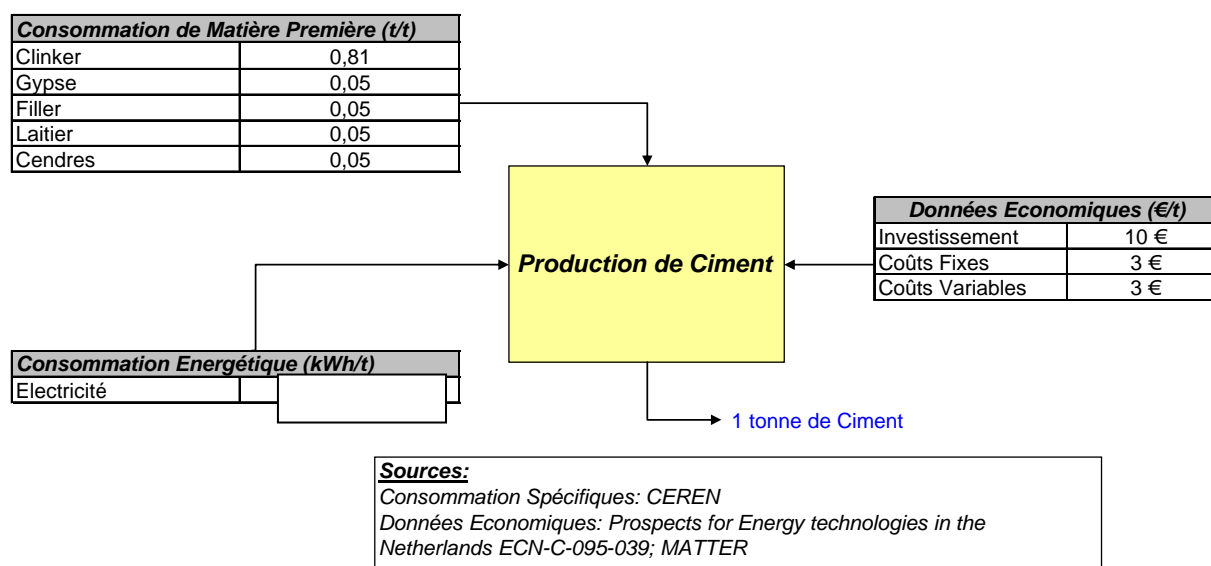
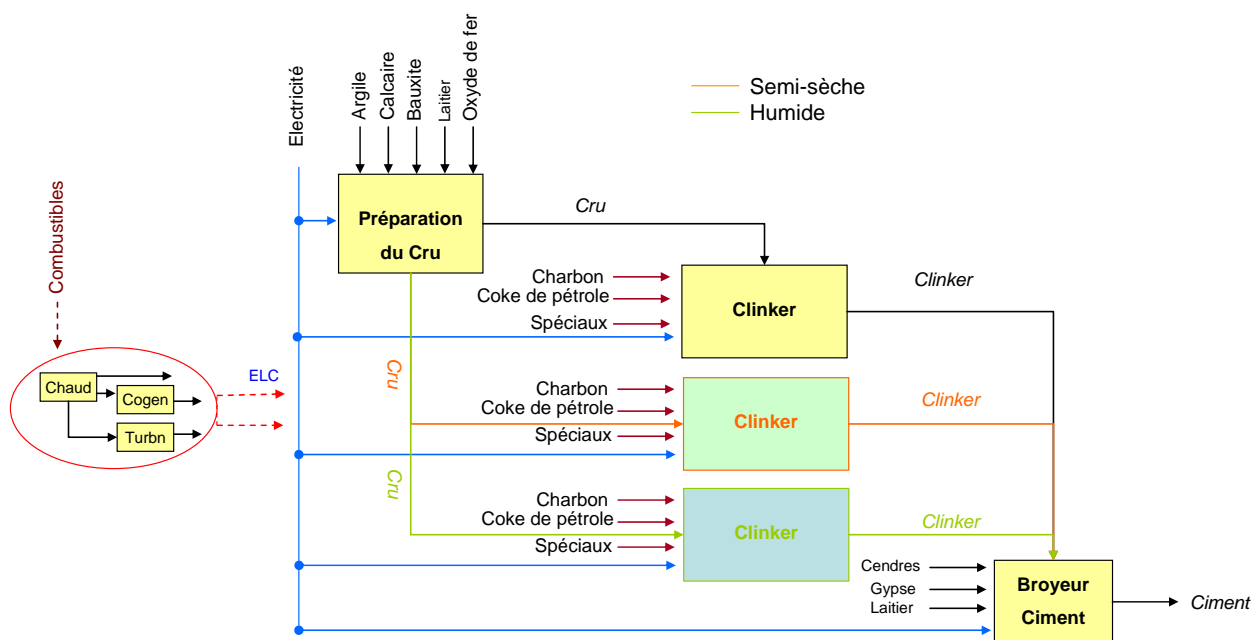


Figure 7: Description du procédé de broyage de ciment

## 1.2. Le Système Energétique de Référence (RES)

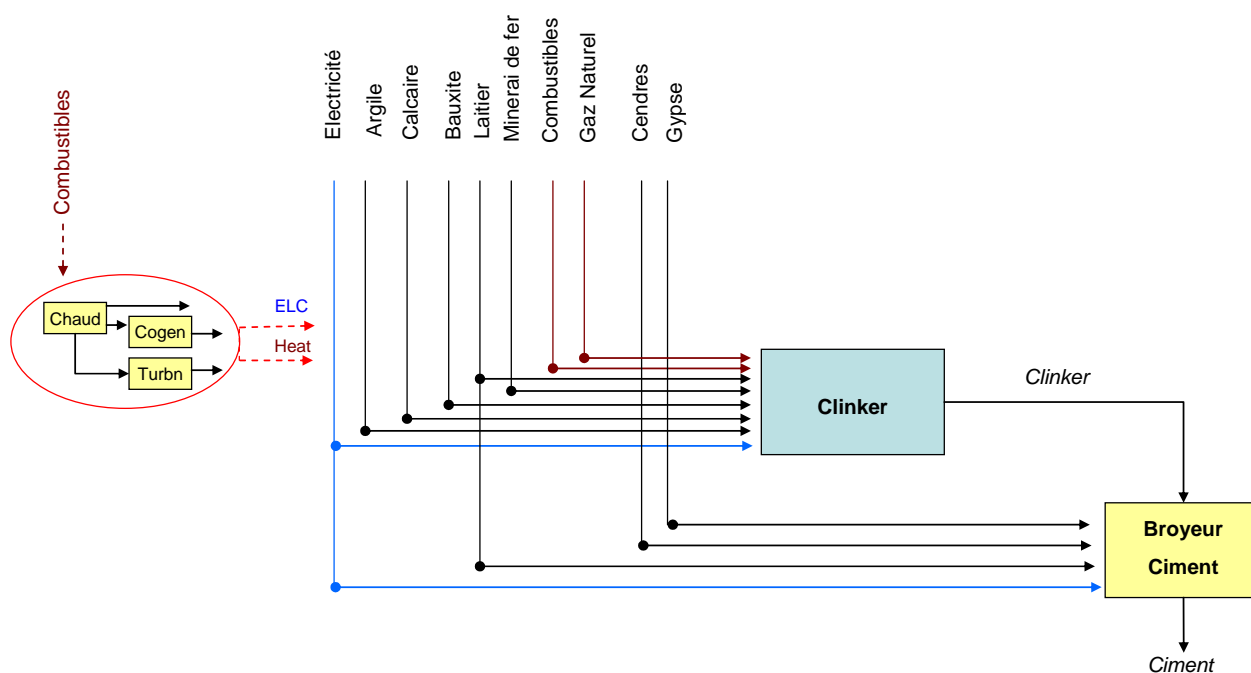
Dans un cadre global, notre étude se base sur le système énergétique de référence (RES) ci-dessous. Le système énergétique de référence est adapté de manière à donner une représentation claire cohérente avec une interaction de plusieurs paramètres techniques et économiques. La conception du RES a été fixée par l'intérêt accordé à chaque atelier en termes de consommation énergétique et les émissions de CO<sub>2</sub>.

En France le système énergétique appliqué est comme suit (Figure 8)



**Figure 8: Le système énergétique de référence pour l'industrie du ciment : cas de la France**

Dans le cas du reste des pays de l'Europe la préparation du cru est agrégée directement au clinker (Figure 9).



**Figure 9: Le système énergétique de référence pour l'industrie du ciment : cas de l'Europe**

## 1.3. Les données Statistiques utilisées comme entrées du modèle

### 1.3.1. Les nouvelles technologies

Toutes les technologies sont disponibles en 2001 et pour une durée de vie de 30 ans. A l'exception les technologies de séquestration et de stockage de CO<sub>2</sub> sont disponibles en 2020.

#### Préparation de cru

La préparation du cru et le broyage du ciment nécessitent un certains nombres d'opérations, parmi les plus importantes : les presses et les classificateurs. L'une des avancées technologiques de ces deux opérations est l'utilisation des presses et des classificateurs/séparateurs à haute rendement (efficaces). Les presses permettent de broyer la matière première et les classificateurs de séparer les particules finement moulues des grosses particules. Les grandes particules sont alors réutilisées à nouveau dans les presses.

Les presses et les classificateurs à haut rendement peuvent être utilisés dans les deux cas, dans la préparation de matières premières (cru) et dans le broyage du clinker (ciment).

#### ➤ *Presse à haut rendement*

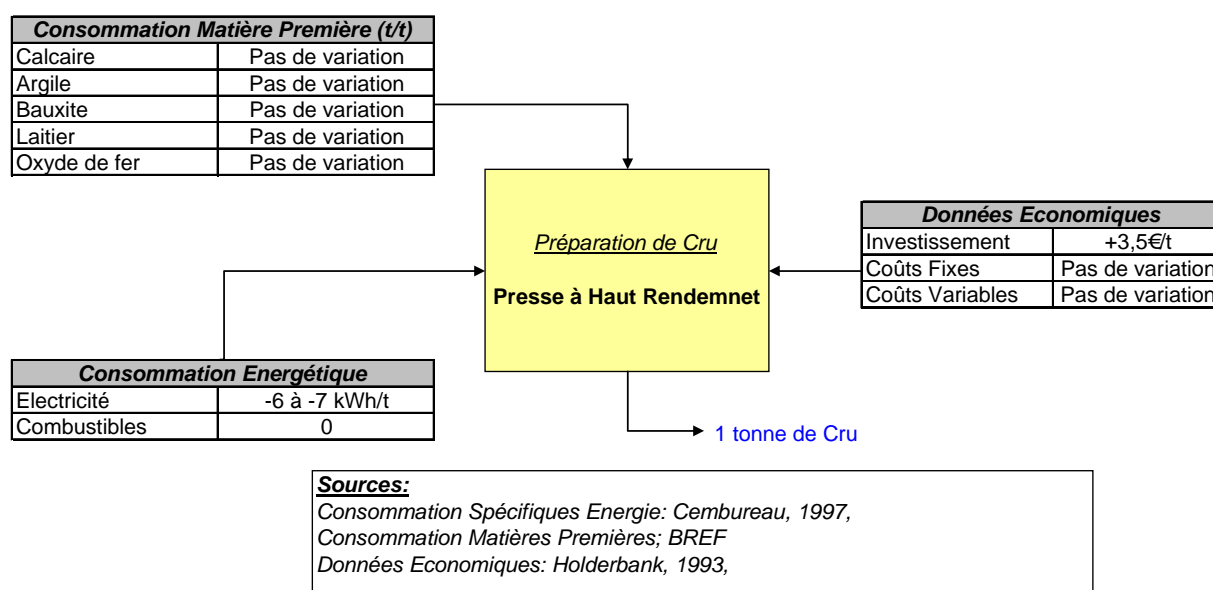
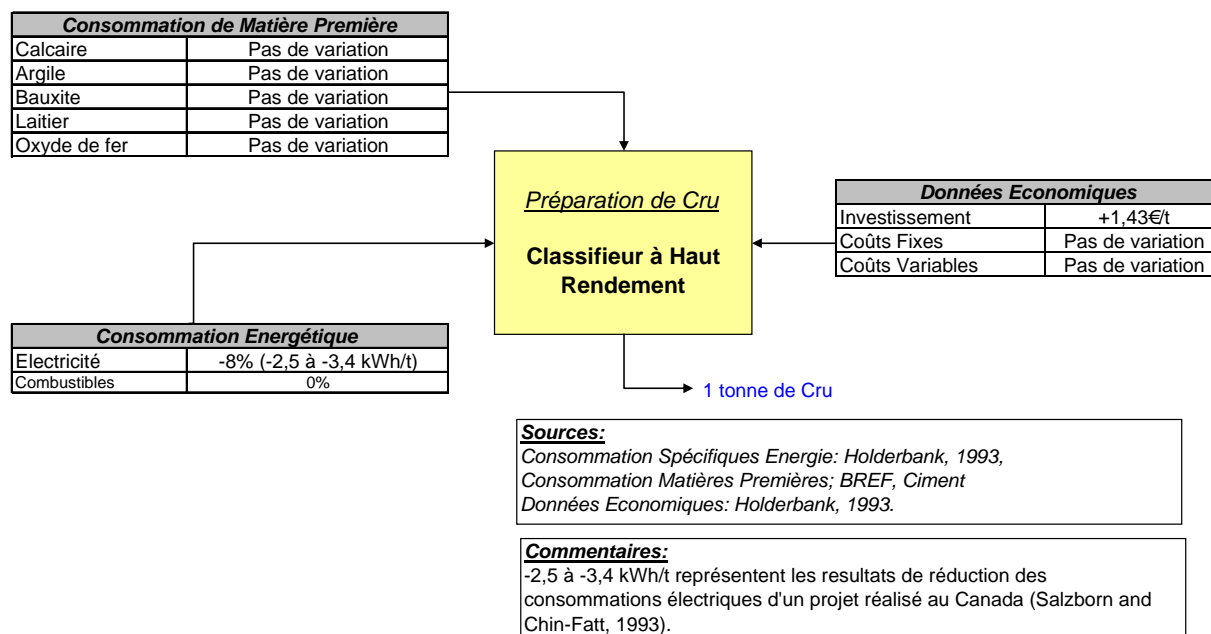


Figure 10: Données d'entrée d'un procédé de préparation de Cru avec une presse à haut rendement

➤ *Classificateur à haut rendement*



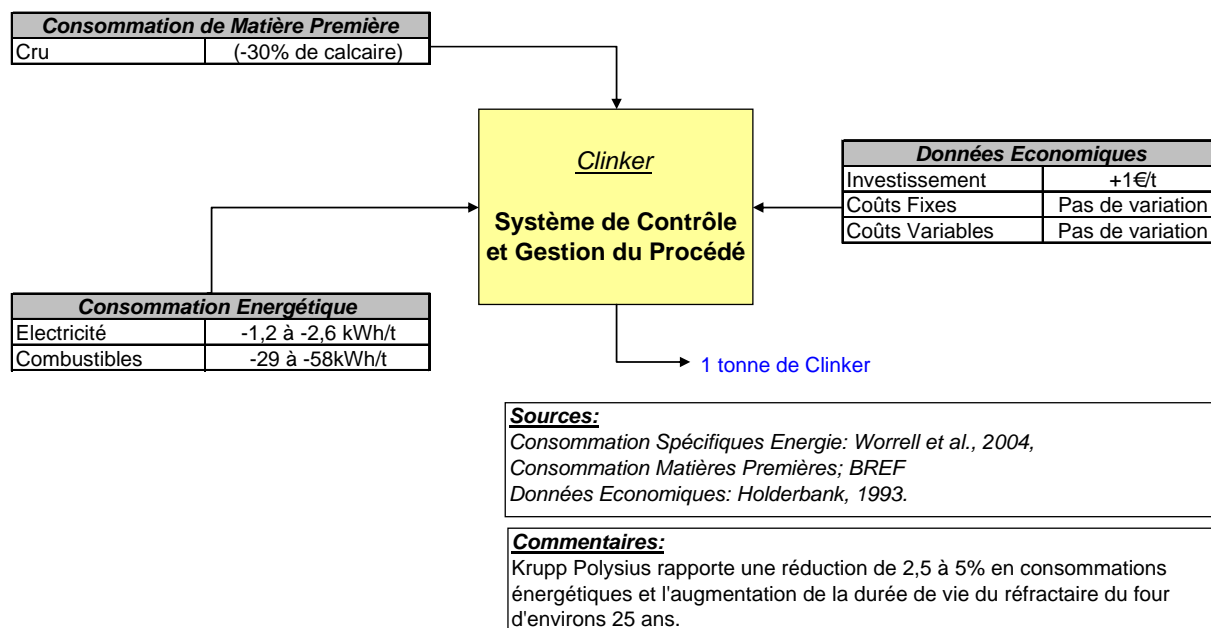
**Figure 11: Données d'entrée d'un procédé de préparation de Cru avec un classificateur à haut rendement**

### Cuisson du clinker

➤ *Système de contrôle et gestion de procédé*

La chaleur du four peut être perdue par des conditions non-optimales du procédé relatives à la gestion du procédé. Un système de contrôle automatique direct par ordinateur peut aider à optimiser le processus de combustion et les conditions du procédé, ce qui conduit à la réduction des consommations énergétiques. En outre, l'amélioration des processus de contrôle permettra d'améliorer la qualité du produit.

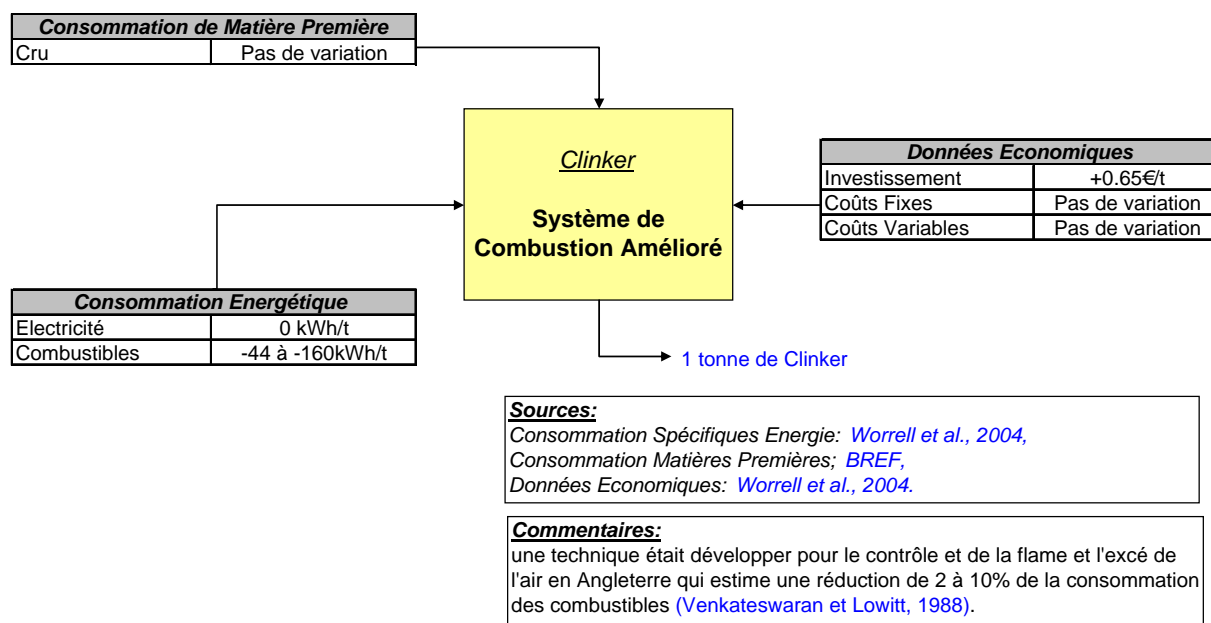
Dans des cimenteries à travers le monde, des systèmes différents sont utilisés, commercialisés par différents fabricants. La plupart des systèmes modernes, utilisent la «logique floue» ou le contrôle d'experts [BREF, 2001].



**Figure 12: Données d'entrée d'un four à clinker (voie sèche) avec un système de contrôle et de gestion**

### ➤ *Système de Combustion Amélioré*

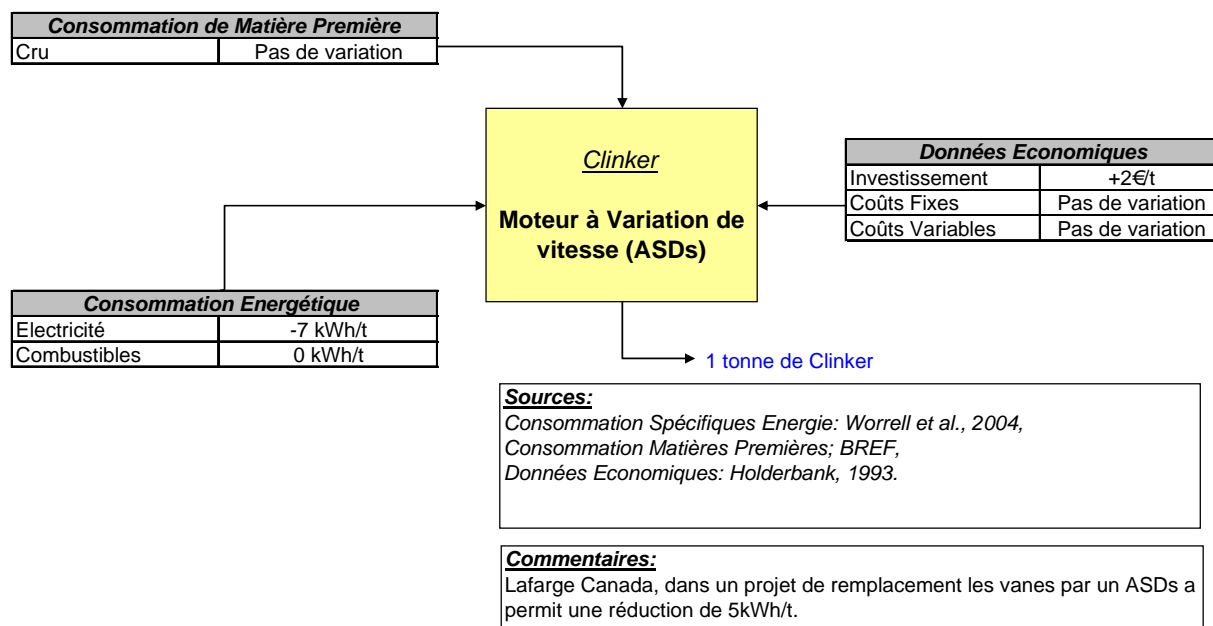
Les systèmes de combustion dans les fours peuvent contribuer à l'inefficacité du four avec des problèmes tels que la mise à feu mal ajustée, combustion incomplète de carburant avec une grande formation de CO et la combustion avec un excès d'air. L'amélioration des systèmes de combustion vise à optimiser la forme de la flamme, le mélange d'air de combustion et de carburant et la réduction de l'utilisation de l'excès d'air.



**Figure 13: Données d'entrée d'un four à clinker (voie sèche) avec un système de combustion amélioré**

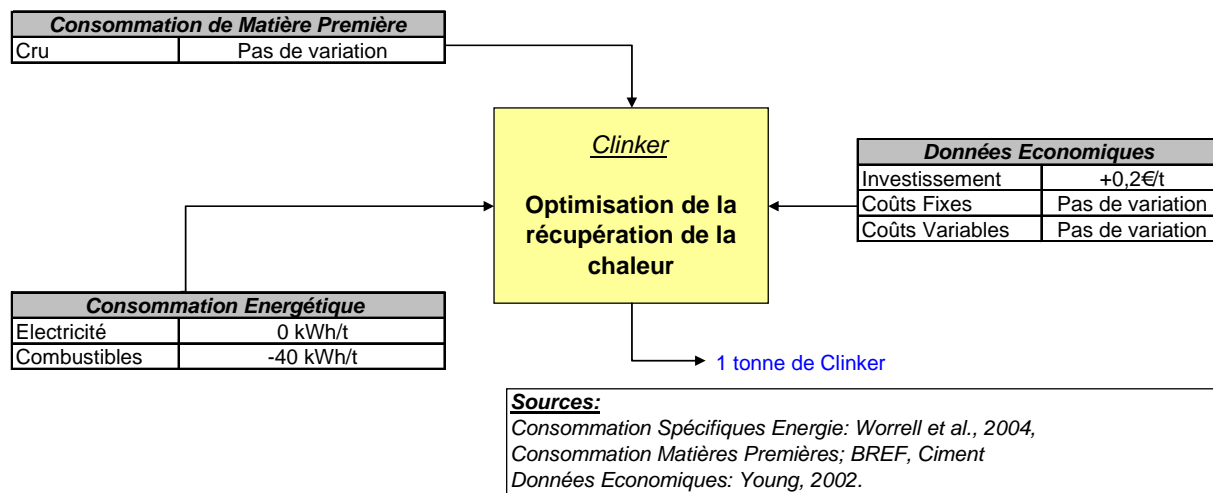
➤ **Moteur à variation de vitesse (ASDs)<sup>8</sup>**

L'utilisation des moteurs à variation de vitesse (vitesse ajustable par variateurs) pour les ventilateurs du four permettent de réduire l'utilisation d'énergie et les coûts de maintenance.



**Figure 14: Données d'entrée d'un four à clinker (voie sèche) avec des moteurs à variation de vitesse**

➤ **Optimisation de la récupération de la chaleur**



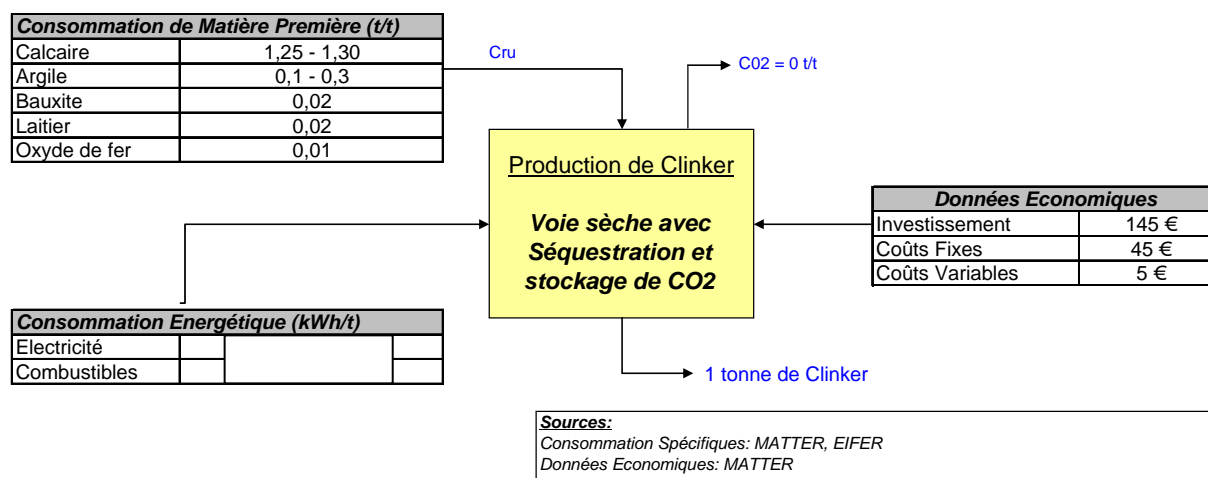
**Figure 15: Donnée d'entrée d'un four à clinker (voie sèche) avec optimisation de la récupération de chaleur**

<sup>8</sup> Adjustable Speed Drives



### ➤ Voie sèche avec séquestration et stockage de CO<sub>2</sub><sup>9</sup>

Ce procédé nécessite l'installation d'une unité de séquestration et de stockage de CO<sub>2</sub>.



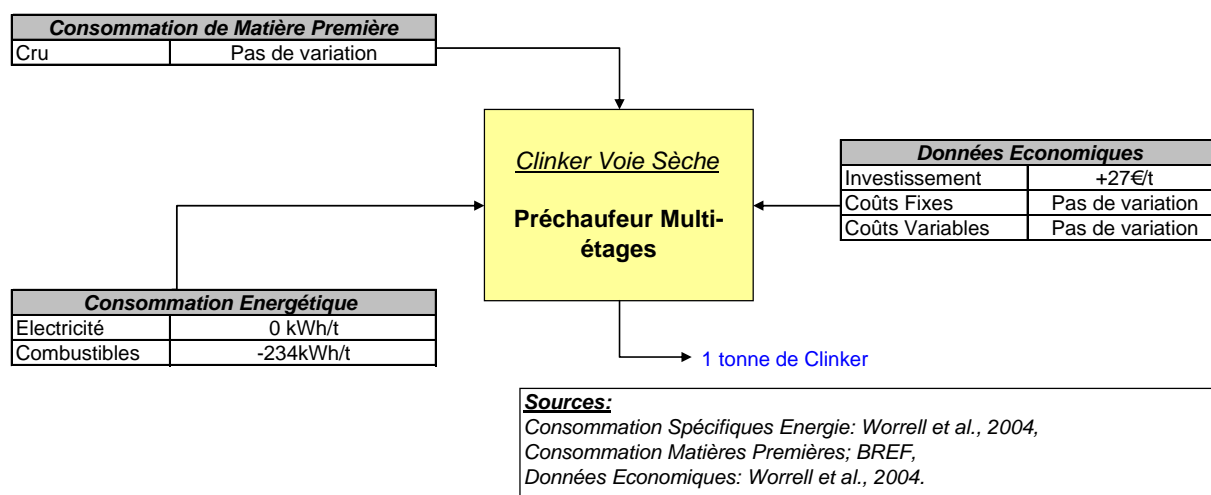
**Figure 16: Données d'entrée d'un four à clinker (voie sèche) avec séquestration et stockage de CO<sub>2</sub>**

### ➤ Voie sèche four à préchauffeur multi-étages

Le préchauffage et même la calcination partielle de la farine (voie sèche et semi-humide) se déroulent en maintenant le cru en suspension dans les gaz chauds qui s'échappent du four rotatif. La surface de contact augmente considérablement ce qui permet théoriquement un échange de chaleur presque total.

Il existe différents types de préchauffeurs. Ils comportent en général de quatre à six cyclones empilés les uns au-dessus des autres et formant une tour de 50 à 120 m de haut. L'étage supérieur peut comporter deux cyclones montés en parallèles pour améliorer la séparation des poussières. Les gaz résiduels du four rotatif traversent les cyclones du bas vers le haut. La matière broyée en une poudre sèche est introduite dans les gaz résiduels du four avant le dernier étage du cyclone, le plus haut. Elle est séparée des gaz dans les cyclones et est réintégrée avant de passer dans le cyclone suivant. Cette opération se répète à chaque étage et à la sortie du dernier étage, la matière est introduite dans le four rotatif. Cette succession de mélange, séparation et reconstitution du mélange à une température plus élevée est nécessaire pour optimiser l'échange de chaleur.

<sup>9</sup> Inclus la production du cru



**Figure 17: Données d'entrée d'un four à clinker (voie sèche) avec préchauffeur multi étages**

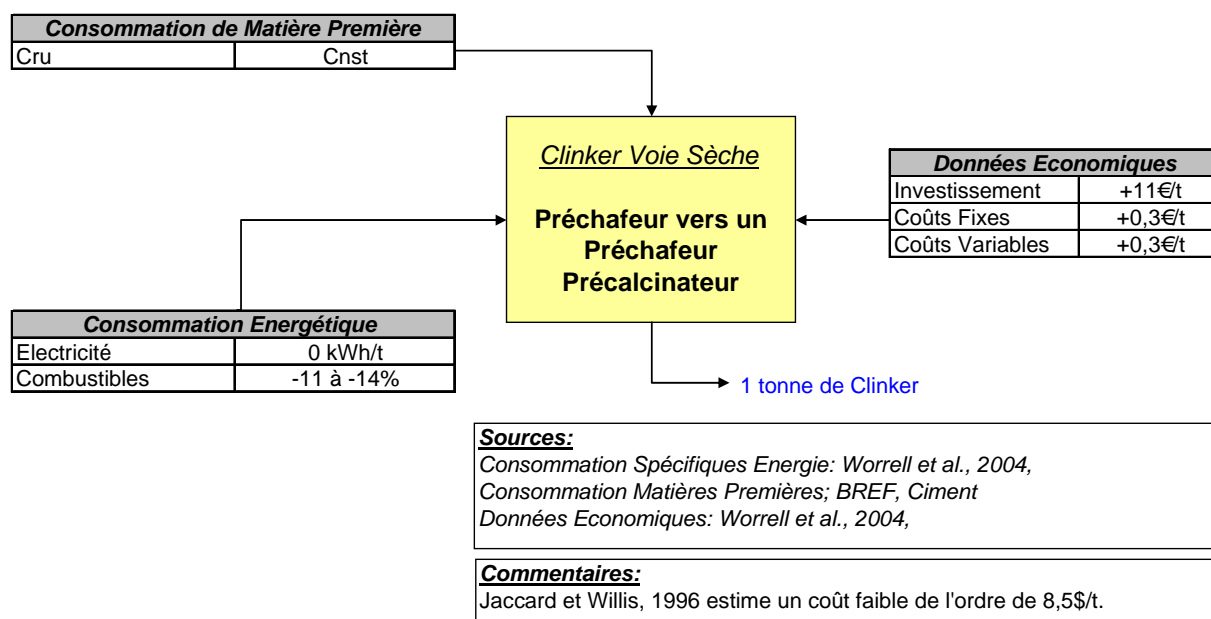
➤ *Voie sèche four avec préchauffeur précalcinateur<sup>10</sup>*

Dans ce procédé, la chauffe se fait en deux points. La combustion primaire du combustible a lieu dans le foyer du four ; une chauffe secondaire se déroule dans une chambre de combustion spéciale située entre le four rotatif et le préchauffeur. Dans un four à précalcinateur type, 60 % de la totalité du combustible peut être brûlé dans cette zone. Cette énergie sert principalement à calciner le cru qui est déjà presque entièrement cuit quand il entre dans le four. De l'air chaud du refroidisseur est utilisé pour la combustion dans le calcinateur. La matière est à 870°C environ à la sortie du calcinateur.

En principe, la chauffe secondaire peut aussi s'appliquer dans un four équipé d'un préchauffeur à grilles. La précalcination augmente la capacité de production de clinker des fours rotatifs.

Les fours avec préchauffeur à cinq étages de cyclones et précalcinateur sont considérés comme la technologie standard pour les usines neuves en voie sèche.

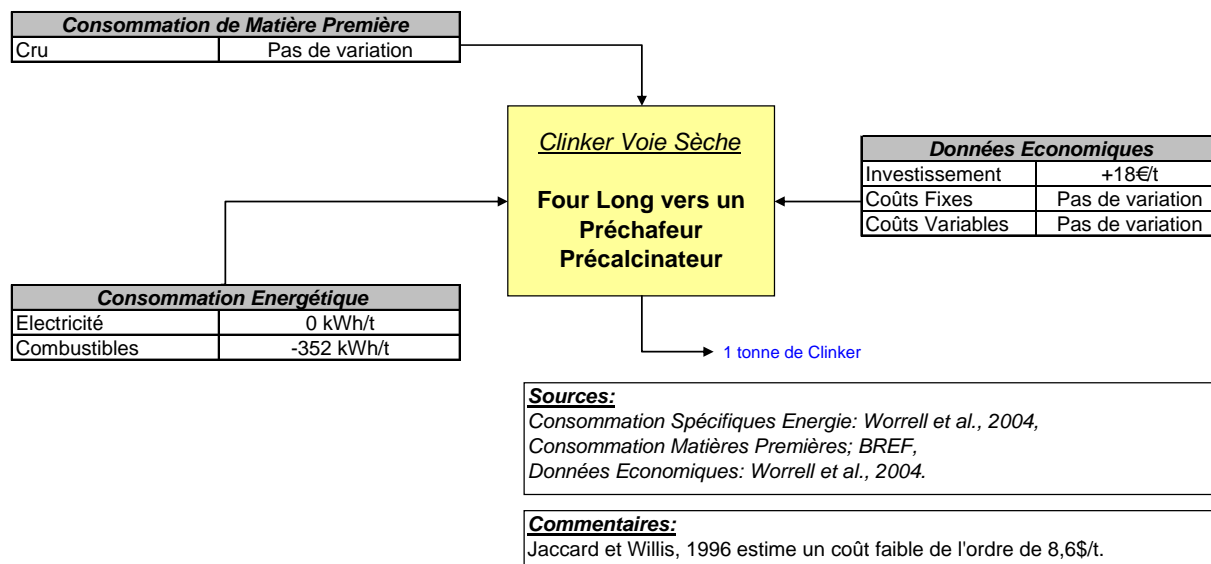
<sup>10</sup> [BREF, 2001]



**Figure 18: Données d'entrée d'un four à clinker (voie sèche) avec un préchauffeur précalcinateur**

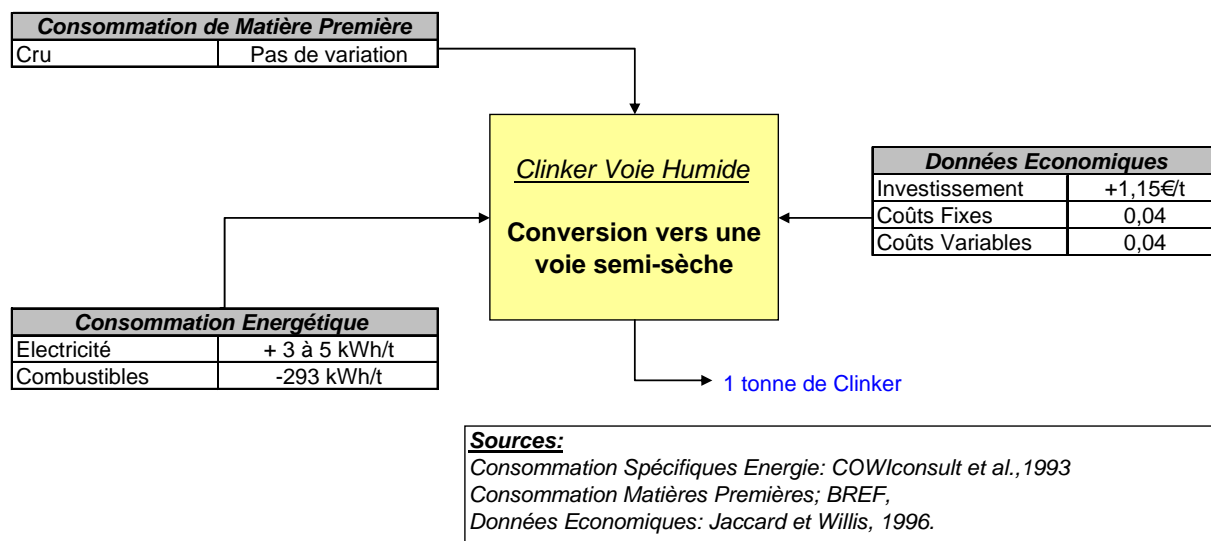
➤ *Voie sèche transformation d'un four long à un four avec préchauffeur et précalcinateur*

Si économiquement rentable un four à voie humide peut être converti à un four à voie sèche qui inclut soit un préchauffeur à plusieurs étages, ou préchauffeur/precalcinateur.



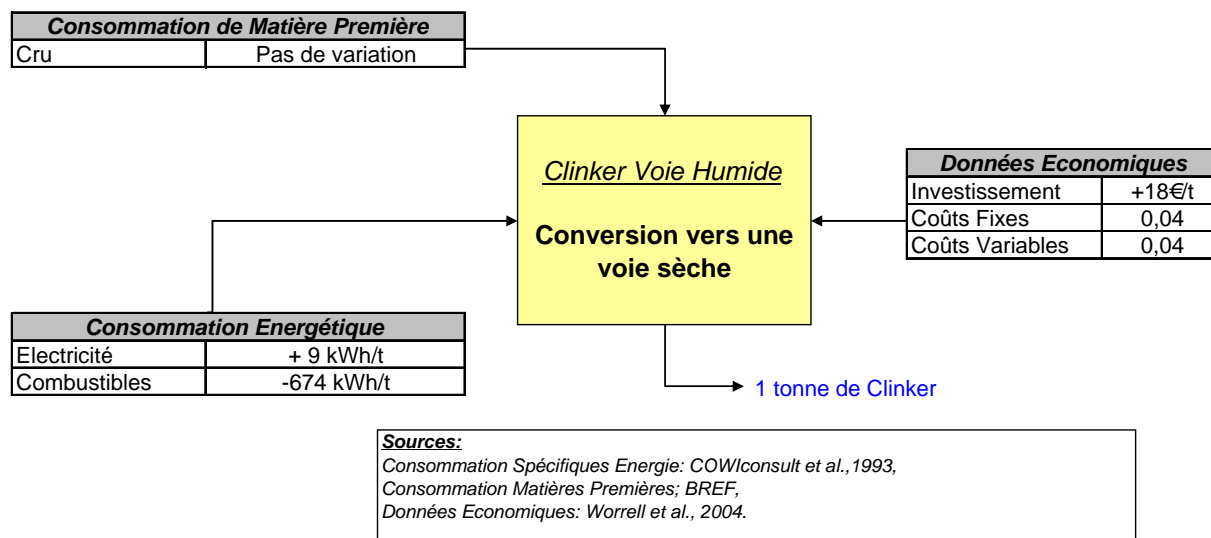
**Figure 19: Données d'entrée d'un four à clinker Long (voie humide) transformé vers une voie sèche avec préchauffeur précalcinateur**

➤ *Conversion voie humide vers une voie semi-sèche*

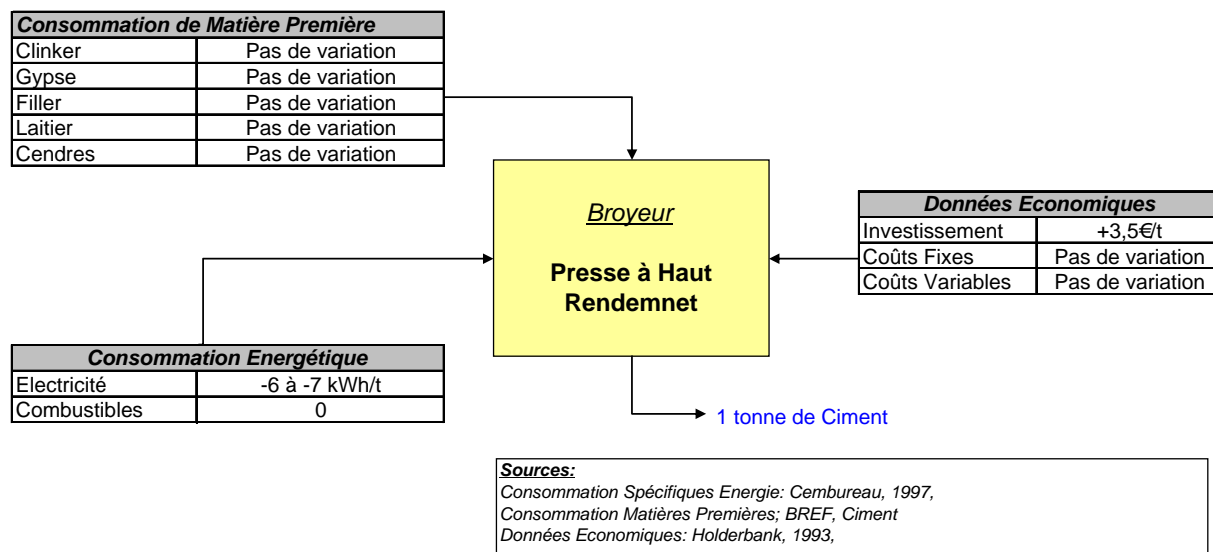


**Figure 20: Données d'entrée conversion d'un four à clinker voie humide vers une voie semi-sèche**

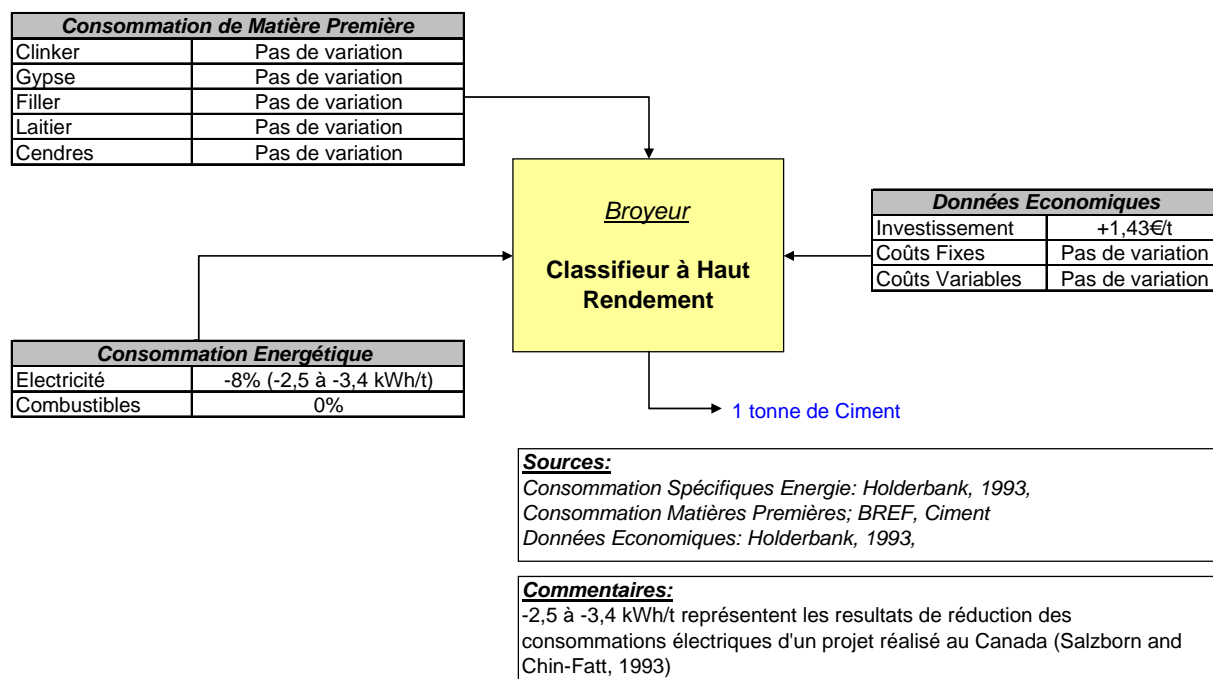
➤ *Conversion voie humide vers une voie sèche*



**Figure 21: Données d'entrée conversion d'un four à clinker voie humide vers une voie sèche**

**Broyage de clinker**➤ *Presse à haut rendement*

**Figure 22: Données d'entrée d'un procédé de broyage de ciment avec une presse à haut rendement**

➤ *Classificateur à haut rendement*

**Figure 23: Données d'entrée d'un procédé de préparation de Cru avec un classificateur à haut rendement**

### **Améliorations globales pour l'industrie du ciment le cas de la France**

Pour l'industrie cimentière en France, les experts sectoriels d'EDF ont estimé certaines améliorations par tranche de temps. Les améliorations ont été estimées par rapport au procédé de base (de référence).

Ciment				
Année	2020	2030	2040	2050
CS <sup>11</sup> électricité (kWh/t)				
CS Combustibles (kWh/t)				

Source : [Escarnot, 2006]

**Tableau 4: Améliorations globales pour l'industrie du ciment en France**

#### **1.3.2. Les données de production**

##### **Les données de production cas de la France**

Les données répertoriées ci-dessous concernent le secteur du ciment (265A). Les données de production proviennent du SESSI, CEREN et de l'INSEE ou des enquêtes auprès des organismes professionnels.

Procédé	Produit	Production (Mt)
Broyage de ciment	Ciment	
Four à clinker (Voie Sèche)	Clinker	
Four à clinker (Voie Semi-Sèche)	Clinker	
Four à clinker (Voie Humide)	Clinker	
Total Clinker	Clinker	
Charges	Cru	

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 5: Production de l'industrie du ciment en France en Mt**

##### **Les données de production cas du reste de l'Europe<sup>12</sup>**

Pays	Produits	Production (Mt)
Autriche	Clinker	3,062
	Ciment	3,776
Belgique	Clinker	6,090
	Ciment	7,510
Suisse	Clinker	0,300
	Ciment	0,370
Chypre	Clinker	1,133
	Ciment	1,398
République Tchèque	Clinker	4,891
	Ciment	6,032

<sup>11</sup> Consommation spécifique

<sup>12</sup> La valeur 0 est la valeur intégrée dans le modèle, elle exprime le manque de la donnée.

Allemagne	Clinker	20,517
	Ciment	25,298
Danemark	Clinker	4,055
	Ciment	5,000
Estonie	Clinker	0,243
	Ciment	0,300
Espagne	Clinker	31,979
	Ciment	39,431
Finlande	Clinker	1,151
	Ciment	1,420
Grèce	Clinker	12,643
	Ciment	15,590
Hongrie	Clinker	2,717
	Ciment	3,351
Irlande	Clinker	0,000
	Ciment	0,000
Islande	Clinker	0,000
	Ciment	0,000
Italie	Clinker	31,568
	Ciment	38,925
Lituanie	Clinker	0,243
	Ciment	0,300
Luxembourg	Clinker	0,000
	Ciment	0,000
Lettonie	Clinker	0,121
	Ciment	0,150
Malte	Clinker	0,000
	Ciment	0,000
Pays-Bas	Clinker	2,797
	Ciment	3,450
Norvège	Clinker	1,321
	Ciment	1,630
Pologne	Clinker	11,602
	Ciment	14,306
Portugal	Clinker	8,315
	Ciment	10,253
Roumanie	Clinker	0,000
	Ciment	0,000
Suède	Clinker	2,108
	Ciment	2,600
Slovénie	Clinker	1,054
	Ciment	1,300
Slovaquie	Clinker	3,836
	Ciment	4,730
Royaume-Uni	Clinker	10,155
	Ciment	12,522

**Tableau 6: Production de l'industrie du ciment pour le reste de l'Europe en Mt**

### 1.3.3. Les consommations énergétiques

#### 1.3.3.1. Consommation de Combustibles par usage final le cas de la France

La consommation de combustibles du secteur du ciment s'élève à 14,796 TWh. Elle représente 9% de l'ensemble des IGCE.

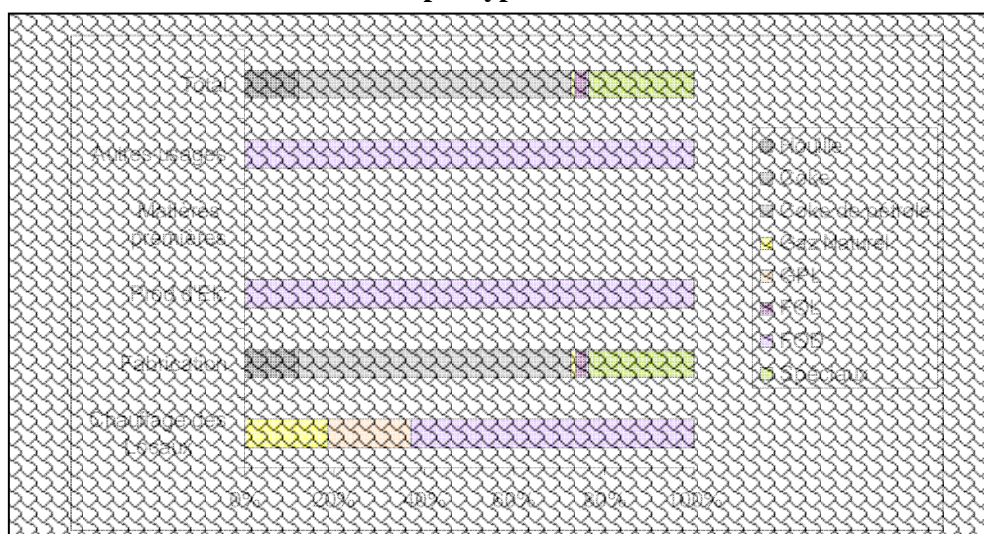
Les principales formes d'énergies utilisées sont variées : prédominance du coke de pétrole, combustibles spéciaux et gaz naturel. Les principaux combustibles consommés sont les suivants :

- le coke de pétrole, avec 8,9 TWh (60% de la consommation de combustibles au lieu de 6% dans l'ensemble des IGCE), représente de loin le combustible le plus utilisé ; il est la première forme d'énergie des autres matériaux de construction (76%)
- les combustibles spéciaux, avec 3,467 TWh (24% de la consommation de combustibles au lieu de 12% dans l'ensemble des IGCE),
- la houille, avec 1,656 TWh (11% de la consommation de combustibles au lieu de 35% dans l'ensemble des IGCE),
- le gaz naturel, avec 0,157 TWh (1% de la consommation de combustibles au lieu de 24% dans l'ensemble des IGCE),
- le fuel lourd, avec 0,323 TWh (2% de la consommation de combustibles au lieu de 5% dans l'ensemble des IGCE).

Segment	Opérations	Combustibles								
		Houille	Coke	Coke de pétrole	Gaz Naturel	GPL	FOL	FOD	Spéciaux	Total
Ciment	Hors chaudières									
	Sous chaudières									
	Total									

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 7: Consommation en TWh par type de combustibles de l'industrie du ciment**



Réalisé à partir des données CEREN

**Figure 24: Répartition des consommations énergétiques par opération (hors chaudière)**



Le coke de pétrole ainsi que les combustibles spéciaux sont largement utilisés dans la branche des ciments, chaux et plâtres grâce à son faible coût et son utilisation possible dans les fours de cimenterie. Les combustibles spéciaux consommés sont principalement les huiles et solvants, les farines animales et les déchets de bois et de papier. Tous ces combustibles sont utilisés dans la fabrication du ciment et de la chaux, les déchets de bois et papier étant également présents dans les autres matériaux de construction [CEREN, 2006].

Ciment		
Spéciaux	Autres déchets végétaux	
	Farines animales	
	Biomasse	
	Pneus usés	
	Déchets de PVC	
	Autres déchets industriels	
	Charbon de bois	
	Autres combustibles spéciaux solides	
	Graisses animales	
	Huiles	
	Autres combustibles spéciaux liquides	
	Total	

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 8: Consommation en TWh des spéciaux par type**

La consommation d'électricité représente 2,3 TWh dont 97% est utilisé pour l'énergie mécanique.

Segment	Usage								
	Eclairage	Energie mécanique	dont Air Comprimé	Electrolyse aqueuse	usage thermique	dont Chauffage des locaux	dont Production froid	Autres usage	Total
Ciment									

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 9: Consommation d'électricité par usage en TWh**

### Consommation énergétique des chaudières

Dans les consommations énergétiques sous chaudière, il apparaît que le gaz naturel, représente la grande part des énergies consommées (79% du total des consommations sous chaudières et hors récupération). Le Fioul représente 21%. Les rendements associés aux chaudières sont comme suit : 95% pour le gaz naturel et 92% pour le fioul.

Segment	Type	Nombre	Combustible	Consommation	Capacité	Disponibilité	Rendement	Age (ans)
Ciment	à tubes de fumée							
	à tubes d'eau							
	de chauffage central							
	autres							
	à tubes de fumée							
	à tubes d'eau							
Total								

Source : CEREN

**Tableau 10: Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières**

### 1.3.3.2. Consommation de Combustibles par usage final le cas de l'Europe

<b>Ciment (NACE 26.51)</b>					
CSe <sup>13</sup>	CSc <sup>14</sup>	Élec	Comb	gaz	gaz
(kWh/t)	(kWh/t)	(GWh)	(GWh)	%	(GWh)
<b>Allemagne</b>					
120	907	3 036	22 945	1%	309
<b>Belgique</b>					
120	907	901	6 811	2%	136
<b>Pays-Bas</b>					
120	907	414	3 129	2%	63
<b>Espagne</b>					
120	907	4 732	35 764	2%	715
<b>Italie</b>					
120	907	4 671	35 304	2%	706
<b>Royaume-Uni</b>					
120	907	1 503	11 357	0%	1
<b>Portugal</b>					
120	907	1 230	9 300	0%	0
<b>Autriche</b>					
120	907	453	3 425	2%	68
<b>TOTAL 9 PAYS UE</b>					
120	907	19 306	145 920	2%	2 357
<b>Hongrie</b>					
120	907	402	3 039	2%	61
<b>Pologne</b>					
120	907	1 717	12 976	2%	260
<b>Slovaquie</b>					
120	907	568	4 290	2%	86
<b>République tchèque</b>					
120	907	724	5 471	2%	109
<b>TOTAL 4 PECO</b>					
120	907	3 410	25 776	2%	516

**Tableau 11: Consommations énergétiques du reste des pays européens**

<sup>13</sup> Consommation Spécifique électricité

<sup>14</sup> Consommation Spécifique combustible

## **Nomenclature**

**Broyeur à boulets** : Grand cylindre métallique horizontal mis en rotation et rempli au 1/3 de boulets d'aciers qui broient la matière en se heurtant et en se frottant dans un mouvement de cascade.

**Broyeur vertical** : Broyeur de conception plus récente où la roche est broyée par des meules, à la façon des moulins à huile de l'antiquité.

**Cendres de centrale thermique** : Résidu de la combustion des charbons dans les centrales thermiques recueilli dans les filtres. A l'état vitreux, elles peuvent devenir actives et leur silice se combine à la chaux dégagée par l'hydratation du clinker.

**Clinker** : Produit de la cuisson des constituants du ciment, à la sortie du four et avant broyage. Le clinker se présente sous forme de nodules durs et cristallisés, de teinte gris foncé pour les ciments habituels et verte pour le clinker de ciment blanc.

**Clinkérisation** : Passage de la matière de l'état de farine crue à l'état de clinker (cuisson).

**Cuisson** : Les composés du ciment sont cuits dans des fours où, à environ 1450 °C, ils prennent une consistance pâteuse et sont proches de la fusion. A la fin de la cuisson ils forment le clinker.

**Farine** : Ou mouture ; état du cru après broyage et avant cuisson.

**Hydraulicité** : Faculté de former, par réaction avec l'eau, des composés hydratés stables très peu solubles dans l'eau.

**Laitiers de hauts fourneaux** : Résidu de la fabrication de la fonte provenant de la gangue des minerais de fer et des fondants que l'on ajoute au minerai. Sa composition est d'environ 1 partie d'alumine pour 2 parties de silice et 3 parties de chaux. Pour être actif, le laitier doit être granulé (projeté à l'état fondu dans un courant d'eau froide). C'est dans cet état vitreux qu'il peut être mélangé au clinker pour former un des éléments résistants des ciments hydratés.

**Pouzzolane** : Matière silico-alumineuse naturelle ou artificielle dans laquelle la silice et l'alumine peuvent se combiner à la chaux à température ordinaire et en présence d'eau, pour former des composés stables. Vient de "Pozzoles", ville proche de Naples, riche en roche silicieuse naturelle éruptive.

**Pouzzolanique** : Qui possède les propriétés des pouzzolanes.

## 2. La chaux

### 2.1. Description et procédés de fabrication

#### 2.1.1. Description

La chaux est un matériau important et polyvalent. Il possède une longue histoire d'utilisation dans la construction, l'agriculture, l'eau et le traitement des déchets. Plus récemment, de la chaux a été utilisée dans de nombreuses fabrications ainsi que les industries de transformation, notamment le papier, le sucre, la production d'acier et la fabrication de briques.

La chaux est obtenue à partir d'un calcaire très pur porté à une température de plus de 900°C (Chambre Syndicale Nationale des Fabricants de Chaux Grasses et Magnésiennes<sup>15</sup>). Il se produit alors une réaction chimique. Le calcaire se décompose en chaux vive et en gaz carbonique. Après cuisson, la chaux vive a gardé le même aspect physique, mais sa masse volumique apparente est devenue plus faible. La chaux vive est avide d'humidité. Elle réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur puis se transforme en une poudre blanche appelée chaux éteinte.

La production de la chaux est assez proche dans son process de la production de ciment, elle est aussi caractérisée par trois phases essentielles qui sont : la préparation de la matière première, la cuisson, le broyage et l'extinction.

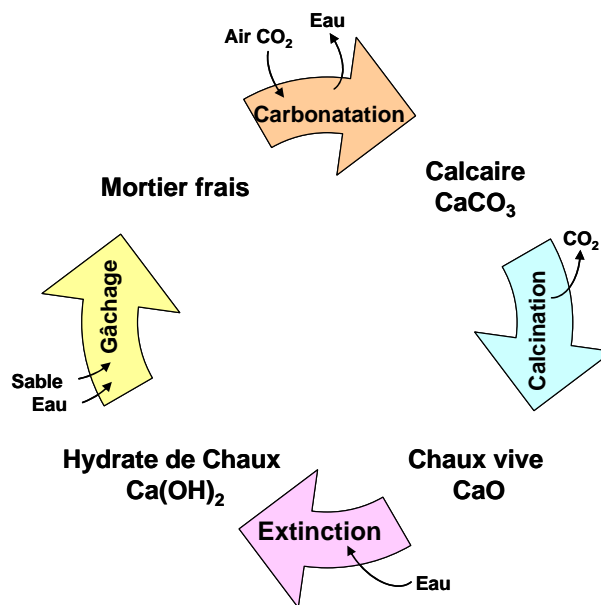


Figure 25: Schéma descriptif du cycle de la chaux

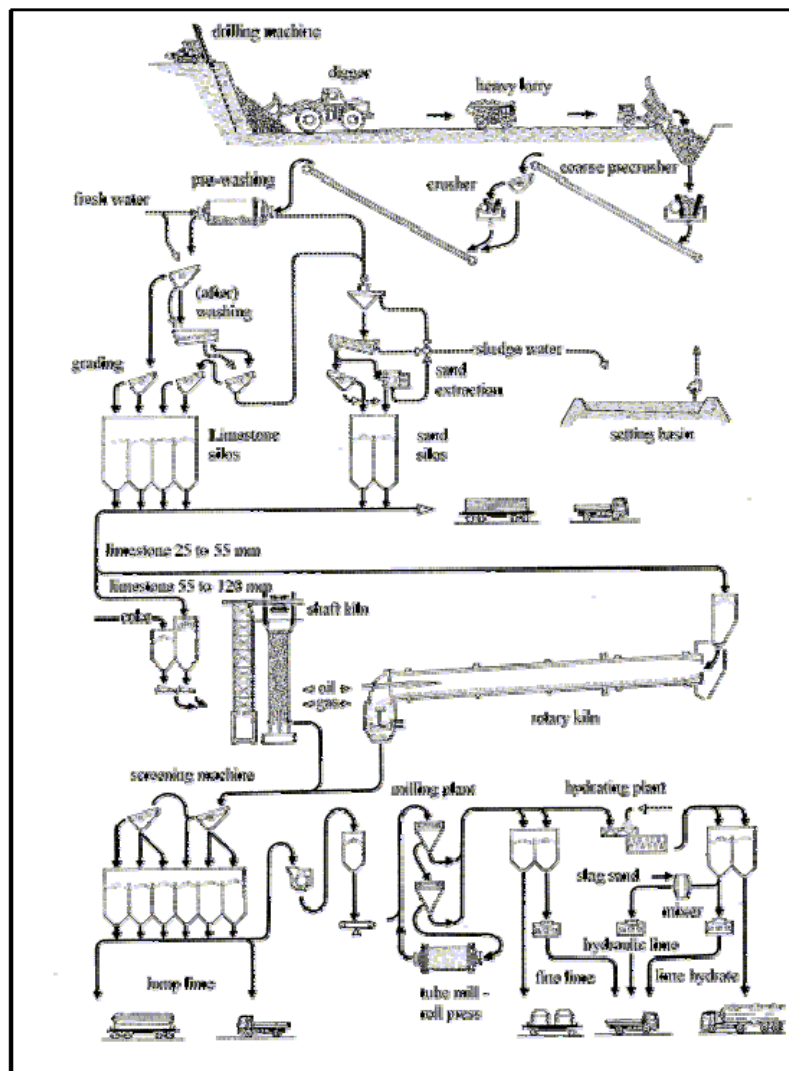
<sup>15</sup> <http://bl-communication.fr/lachaux/fabrication.html>

### 2.1.2. Procédés de fabrication<sup>16</sup>

Pour l'essentiel, les procédés de fabrication de la chaux passent par les étapes fondamentales suivantes :

- extraction du calcaire,
- stockage et préparation du calcaire,
- stockage et préparation des combustibles,
- cuisson du calcaire,
- broyage de la chaux vive,
- hydratation et extinction de la chaux vive,
- stockage,
- manutention et transport.

Dans notre description on ne s'intéresse qu'aux étapes essentielles tel que : la préparation du calcaire, la cuisson, le broyage et l'extinction



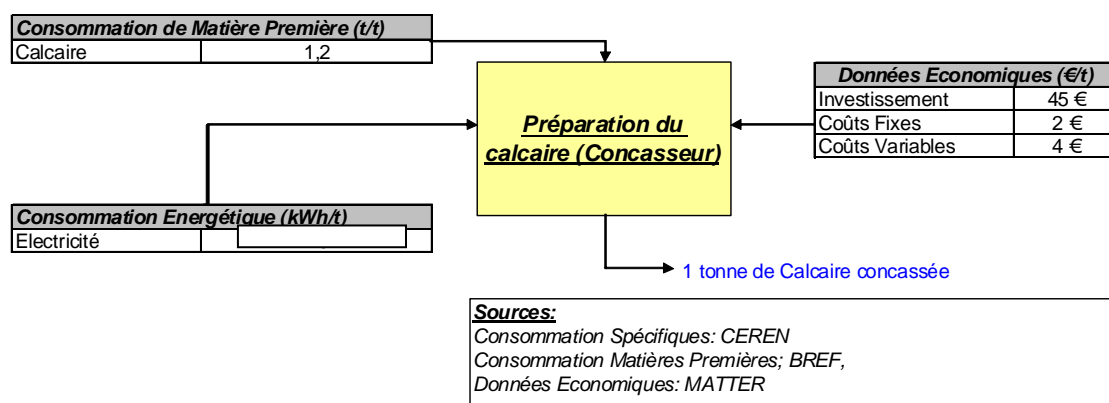
<sup>16</sup> Pour plus de détails voir [BREF, 2001]

**Figure 26: Schéma descriptif du procédé de fabrication de la chaux****Préparation du calcaire**

La préparation de la matière première nécessite selon les types de four de ramener des moellons de calcaire d'un mètre de diamètre à des gabarits appropriés entre 5 et 200 mm. Les concasseurs primaires ramènent les moellons à une taille de 100 à 250 mm. Les pierres en sortie sont acheminées à des tamis vibrants qui séparent et recyclent les gros morceaux, tandis que le matériau qui traverse les cribles sert à alimenter le four ou peut être déversé dans des concasseurs secondaires situés en aval de la chaîne.

Les concasseurs secondaires produisent des galets de 10 à 50 mm qui, après criblage, sont transférés vers des silos de stockage du calcaire ou des compartiments de stockage avant d'être chargés dans le séchoir ou le four à chaux.

En fonction de la nature de la roche, on utilise différents types de concasseurs primaires : concasseurs rotatifs, à mâchoires ou à percussion. Les concasseurs à mâchoires et à percussion servent souvent de concasseurs secondaires.

**Figure 27: Données d'entrée du procédé de préparation du calcaire****Calcination de la chaux**

Le procédé de calcination de la chaux implique de fournir une chaleur suffisante à plus de 900 °C pour chauffer le calcaire et déclencher la décarbonatation. La chaux vive est maintenue pendant une durée déterminée à une température élevée de l'ordre de 1200 à 1300°C pour contrôler la réactivité.

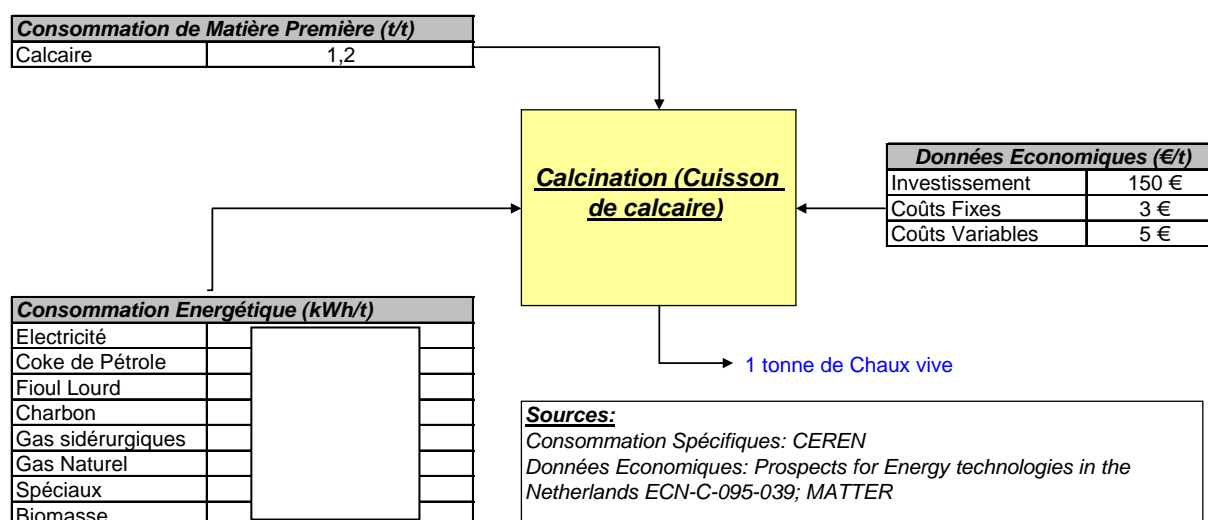
Bien qu'un nombre relativement limité de configurations ait prédominé, Il existe une grande diversité de techniques et de concepts de four avec de multiples options parfaitement adaptées à des applications données. Les propriétés des pierres, le volume de poussières généré et la qualité du produit doivent être pris en considération dans le choix d'une technologie de four. De nombreux producteurs de chaux travaillent avec plusieurs types de four, utilisant différentes granulométries de calcaire d'alimentation et produisant différentes qualités de chaux. Les principales caractéristiques de quelques types de fours à chaux sont synthétisées dans le Tableau 12.

Type de four	Combustibles	Production (tonnes/jour)	Granulométrie d'alimentation (mm)
Vertical			
Alimentation mixte	S	60-200	20-200

Double chambre inclinée	G,L,S	10-160	20-100
Plusieurs chambres	G,L,S	40-225	20-150
annulaire	G,L,S	80-600	10-250
Cycles alternés (standard)	G,L,S	100-600	25-200
Cycles alternés (chaux fine)	G,S	100-300	10-30
Brûleur central	G,S	40-80	40-150
Chambres externes	G,L	40-120	80-350
Brûleur à faisceau	G,L,S	50-800	20-175
Voûte interne	G,L,S	15-250	25-120
<b>Rotatif</b>			
Long	G,L,S	160-1500	poussières-60
Avec préchauffeur	G,L,S	150-1500	0-60 <sup>b</sup>
A grilles mobiles	G,L,S	80-130	15-45
Avec mise en forme au sommet	G,L,S	30-100	5-40
En lit fluidisé	G,L	30-150	0-2
Avec four à calcination rapide	G,L	300-1500	0-2
A sole rotative	G,L,S	100-300	10-40
G = Gazeux ; L = Liquide ; S = Solide.			

Source : [EuLA]<sup>17</sup>

**Tableau 12: Caractéristiques de quelques types de fours à chaux**



**Figure 28: Données d'entrée du four à chaux**

<sup>17</sup> European Lime Association

### **Production de la chaux vive**

La fabrication de la chaux vive en sortie de four a pour but de produire un certain nombre de catégories de granulométries et de qualités de particules demandées par les différents utilisateurs. On utilise plusieurs procédés, dont le criblage, le concassage, la pulvérisation, le broyage et le tri pneumatique. En sortie de four, la chaux en roches est souvent criblée (normalement à environ 5 mm) afin d'évacuer une fraction de fines moins pure.

### **Production de chaux éteinte**

La chaux éteinte comprend la chaux hydratée (poudre sèche d'hydroxyde de calcium), ainsi que le lait de chaux et la chaux en pâte.

#### **- Production de chaux hydratée**

L'hydratation de la chaux implique un apport d'eau dans un hydrateur. La quantité d'eau ajoutée équivaut approximativement au double du volume stœchiométrique requis pour la réaction d'hydratation.

Il existe de nombreux concepts d'installation. L'hydrateur se compose de paires de pales hélicoïdales contrarotatives qui agitent vigoureusement la chaux en présence d'eau. Il se produit alors une forte réaction exothermique qui génère 1 140 kJ par kg de CaO [BREF, 2001].

Le dégagement de chaleur provoque une importante ébullition qui crée un lit en partie fluidisé. La poussière est entraînée dans la vapeur dégagée au cours du processus. Si cette poussière est séparée dans un laveur de gaz, il en résulte un lait de chaux en suspension qui est normalement recyclé vers l'hydrateur.

Après hydratation, le produit est amené dans un séparateur à courant d'air où les fractions grossières et fines sont triées par un flux d'air recyclé. Tout ou partie de la part la plus grosse peut être broyée et recyclée. Quant aux grains fins, ils sont transportés jusqu'aux silos de stockage. De là, ils sont soit déchargés pour un transport en vrac, soit transférés vers l'installation de conditionnement où ils sont mis en sacs ou chargés dans des conteneurs de vrac intermédiaires.

#### **- Production de lait de chaux et de chaux en pâte**

On produit le lait de chaux et la chaux en pâte par extinction de la chaux avec un excès d'eau. L'opération est réalisée dans des unités d'extinction fonctionnant par lot ou en continu. L'expression « lait de chaux » décrit une suspension fluide de chaux éteinte dans l'eau. Les laits de chaux peuvent contenir jusqu'à 40 % de solides en masse. Un lait qui présente une teneur élevée en solides est parfois appelé une boue de chaux. La chaux en pâte est une dispersion épaisse de chaux éteinte dans l'eau. Les chaux en pâte contiennent normalement des solides à hauteur de 55 à 70 % en masse.



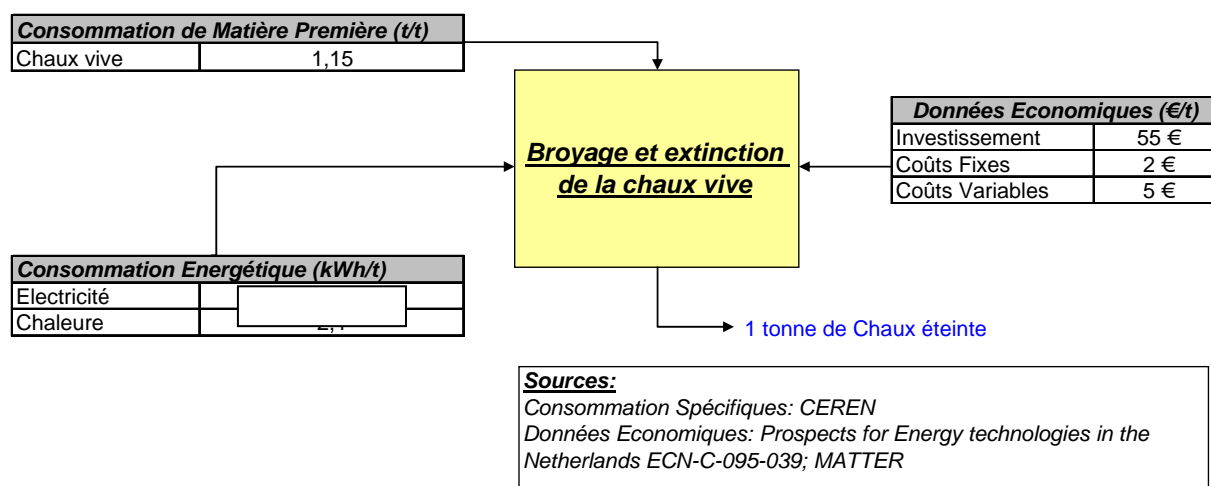


Figure 29: Données d'entrée du procédé de broyage et d'extinction de la chaux vive

## 2.2. Le Système Energétique de Référence (RES)

Dans un cadre global, notre étude se base sur le système énergétique de référence (RES) ci-dessous. Le système énergétique de référence est adapté de manière à donner une représentation claire cohérente avec une interaction de plusieurs paramètres techniques et économiques. La conception du RES a été fixée par l'intérêt accordé à chaque atelier en termes de consommation énergétique et d'émissions de CO<sub>2</sub>.

En France le système énergétique appliqué est construit comme suit (Figure 30).

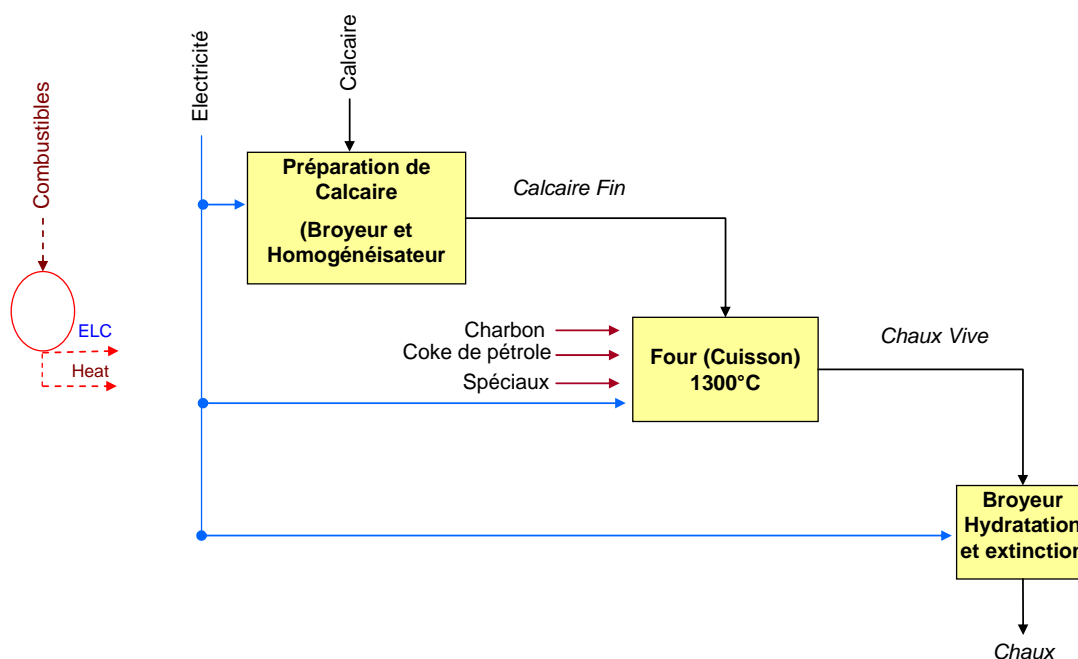


Figure 30: Le système énergétique de référence pour la chaux : cas de la France

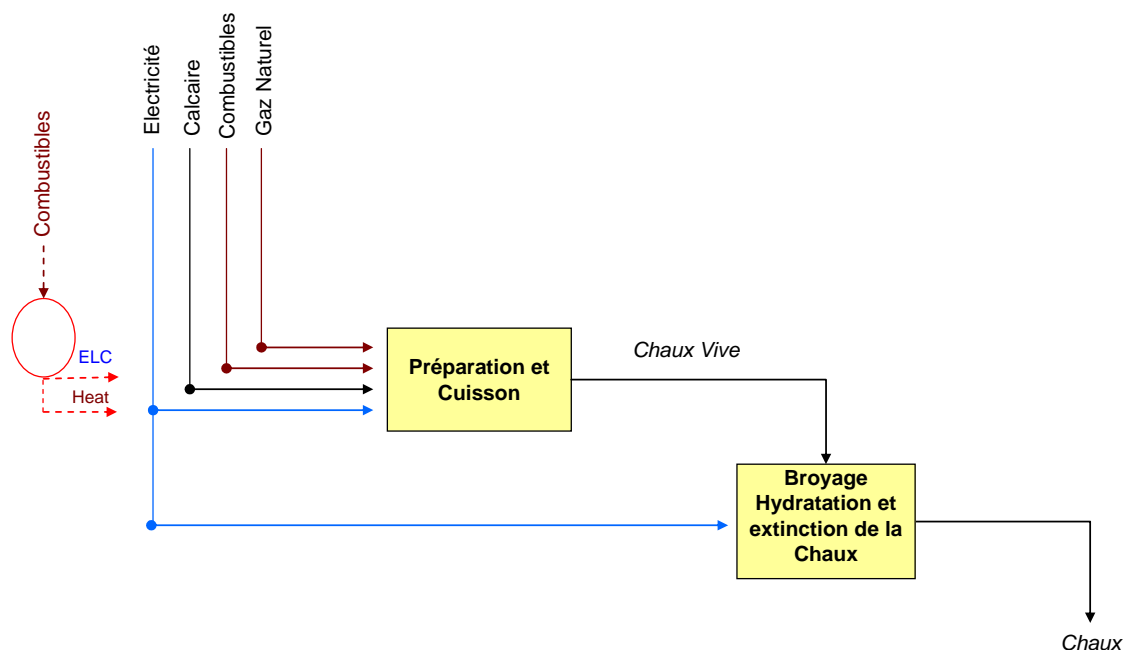


Figure 31: Le système énergétique de référence pour la chaux : cas de l'Europe

## 2.3. Les données Statistiques utilisées comme entrées du modèle

### 2.3.1. Les nouvelles technologies

#### Préparation du calcaire

##### ➤ Concasseur à haut rendement

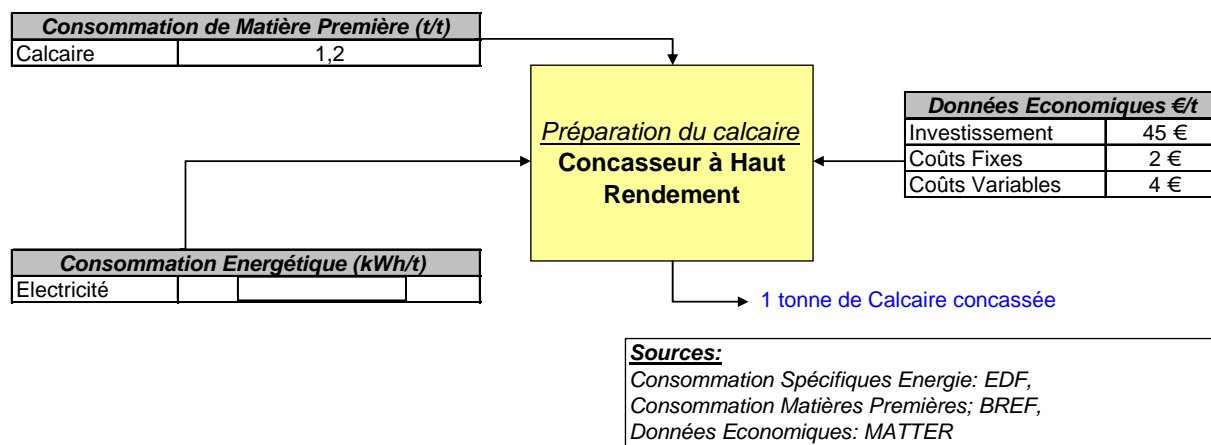


Figure 32: Données d'entrée du procédé de préparation du calcaire avec concasseurs à haut rendement

## Calcination de la chaux

### ➤ Four vertical à alimentation mixte

Les fours verticaux à alimentation mixte qui sont installés aujourd'hui utilisent du calcaire d'une granulométrie maximum comprise entre 50 et 150 mm. Le combustible est le plus souvent du coke. Les pierres et le coke sont mélangés et chargés afin que, dans la mesure du possible, ils ne soient pas séparés.

La qualité de la chaux est plutôt moyenne avec une réactivité nettement plus basse que lorsqu'elle est produite dans un four rotatif, avec un  $\text{CaCO}_3$  de qualité comparable.

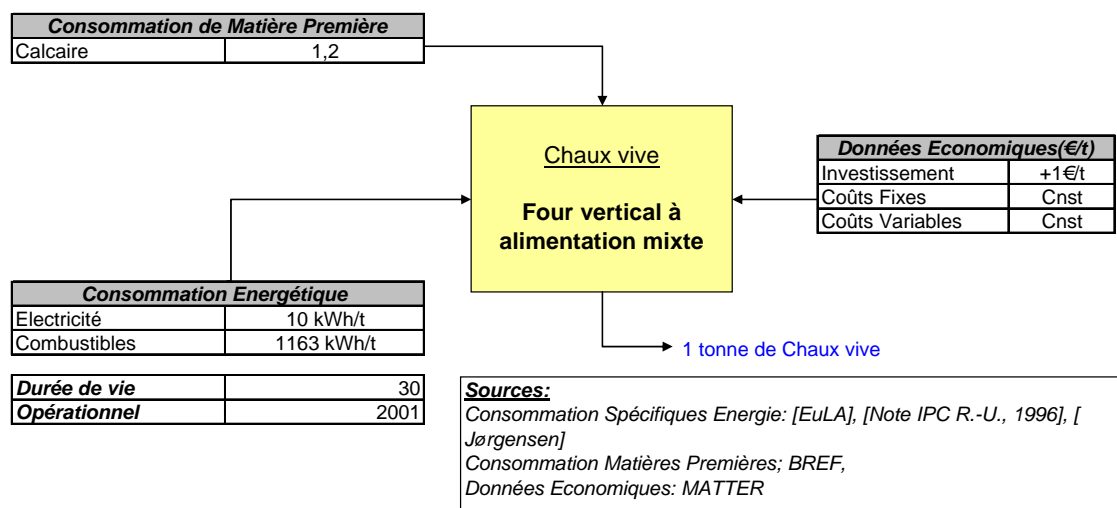


Figure 33: Données d'entrée four vertical à alimentation mixte

### ➤ Four vertical à double chambre inclinée

Le four à double chambre inclinée est en grande partie de section rectangulaire, mais sa zone de calcination comprend deux sections inclinées. En regard de chaque section inclinée, des arcs en saillie créent des espaces où le combustible et l'air comburant préchauffé sont brûlés dans des chambres de combustion.

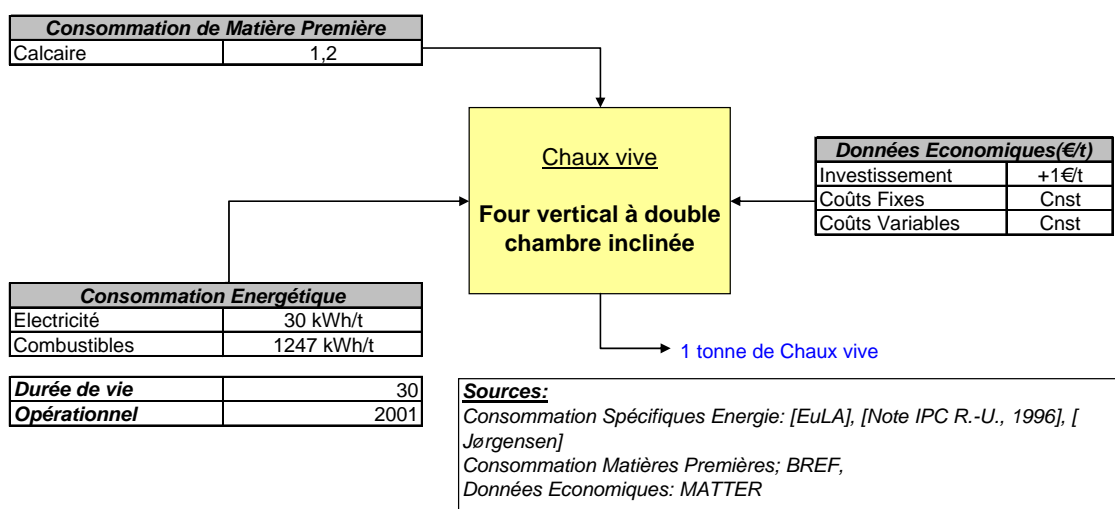


Figure 34: Données d'entrée four vertical à double chambre inclinée

Il est possible d'utiliser toute une gamme de combustibles solides, liquides ou gazeux [BREF, 2001]. Le four peut produire une chaux réactive à faible teneur en carbonate.

### ➤ *Four vertical à plusieurs chambres*

Cette configuration est une déclinaison du four à double chambre inclinée. La zone de calcination comporte alors 4 ou 6 sections inclinées successivement, à l'opposé desquelles se trouve un arc en saillie. Ces arcs ont la même fonction que dans un four à double chambre inclinée.

L'air de refroidissement est préchauffé par la chaux dans la zone de refroidissement, puis extrait, dépoussiéré et réinjecté via les chambres de combustion.

L'une des caractéristiques de ce four tient au fait qu'il est possible de moduler la température des chambres de combustion inférieures afin de contrôler la réactivité de la chaux sur une amplitude considérable. Le four peut être chauffé au moyen de combustibles solides, liquides ou gazeux (ou un mélange) [BREF, 2001].

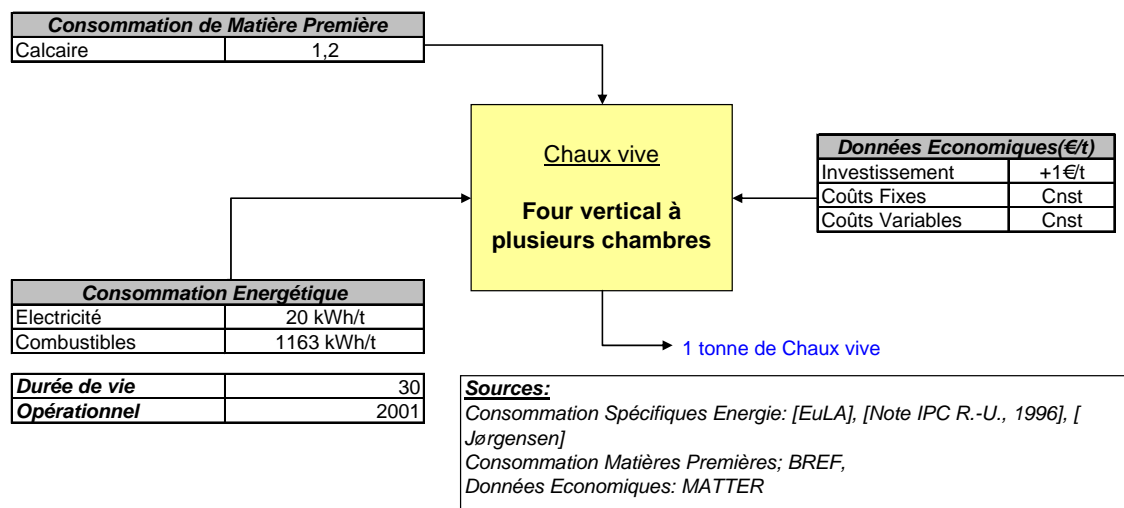


Figure 35: Données d'entrée four vertical à plusieurs chambres

### ➤ *Four vertical annulaire*

Dans un four annulaire, la principale caractéristique est un cylindre central qui restreint la largeur de la chambre annulaire et qui, avec les voûtes prévues pour la distribution des gaz de combustion, garantit une bonne répartition de la chaleur.

La colonne centrale permet également qu'une partie des gaz de combustion provenant des brûleurs inférieurs soient récupérés dans la cuve et réinjectés dans la chambre inférieure. Ce recyclage réduit la température au niveau des brûleurs inférieurs, tout en abaissant la température dans les dernières phases de la calcination.

Cette combinaison garantit un produit à faible teneur en  $\text{CaCO}_3$  et à forte réactivité. Le four vertical annulaire peut être chauffé au gaz, au fuel ou avec un combustible solide [BREF, 2001].

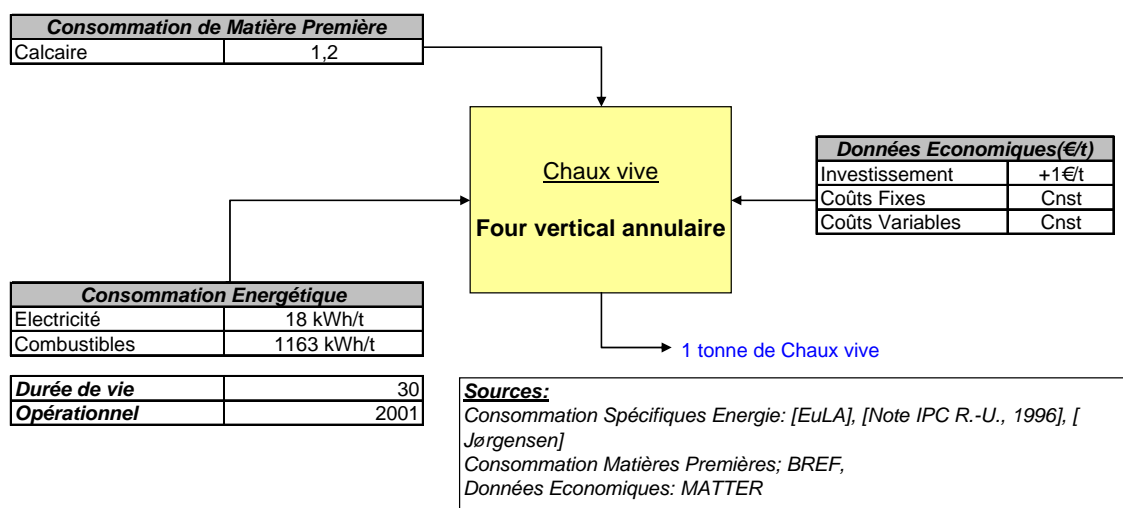


Figure 36: Données d'entrée four vertical annulaire

➤ *Four vertical à cycles alternés*

Le four vertical à cycles alternés (communément appelé four Maerz). Il se distingue par le fait qu'il se compose de deux cuves cylindriques raccordées ensemble. Le four peut être chauffé au gaz, au fuel ou avec un combustible solide (dans ce dernier cas, le combustible doit être sélectionné avec soin).

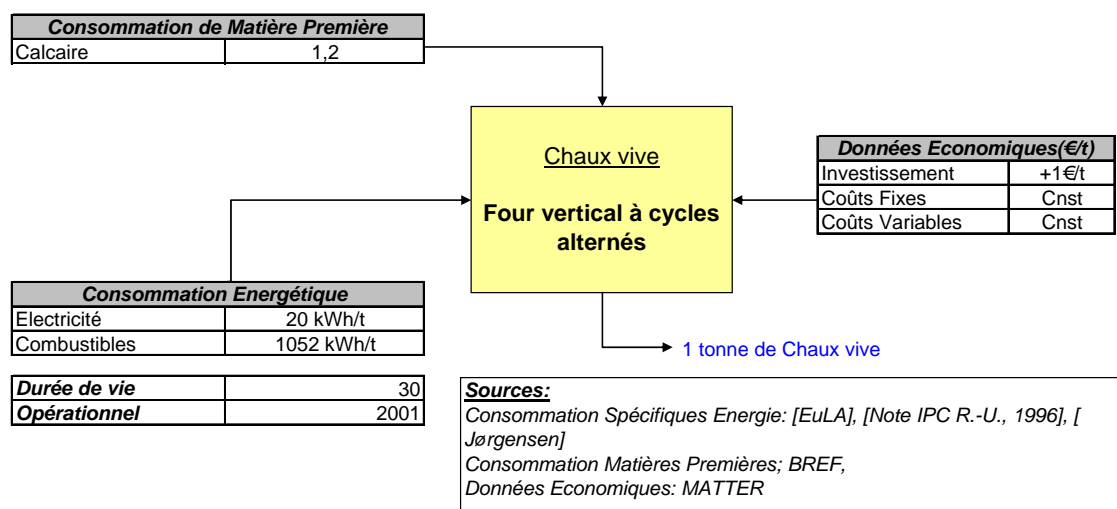


Figure 37: Données d'entrée four vertical à cycles alternés

➤ *Fours rotatifs avec préchauffeur à cyclones*

Les fours rotatifs modernes sont équipés de préchauffeurs et sont en général nettement moins longs qu'un four rotatif traditionnel (40 à 90 m, par exemple). L'utilisation de la chaleur diminue à cause de la réduction des pertes par rayonnement et convection, et grâce à la meilleure récupération de chaleur à partir des gaz d'exhaure.

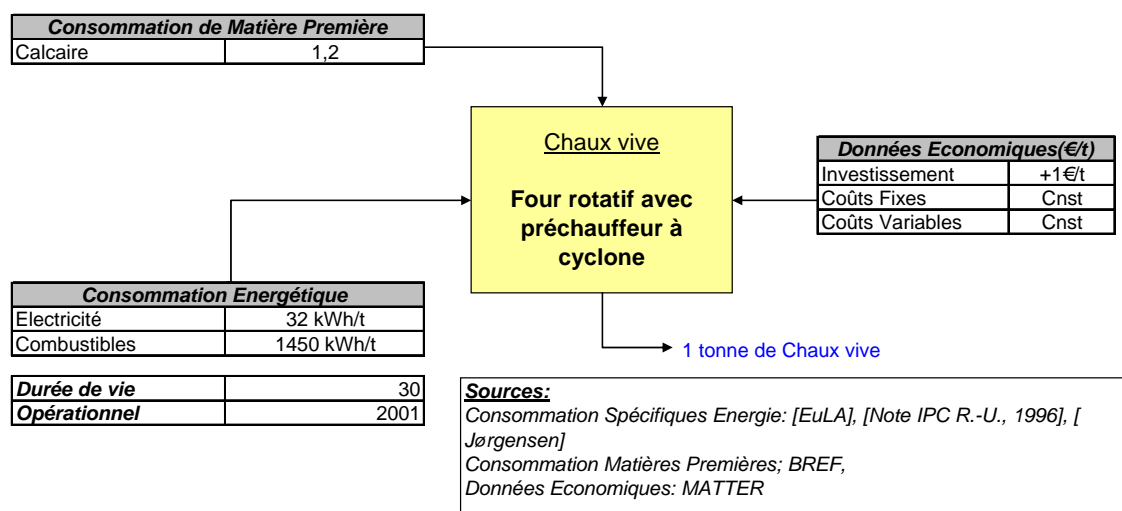


Figure 38: Données d'entrée four rotatif avec préchauffeur à cyclone

### Production et extinction de la chaux vive

#### ➤ Concasseur à haut rendement

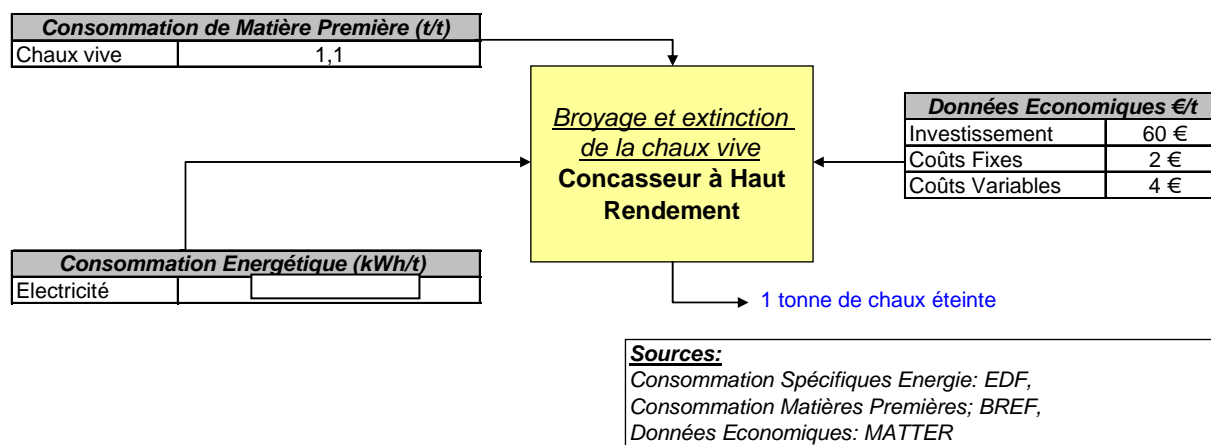


Figure 39: Données d'entrée concasseur à haut rendement

## 2.3.2. Les données de production

### Les données de production cas de la France

Les données répertoriées ci-dessous concernent le secteur de la chaux (265 C). Les données de production proviennent du SESSI, du CEREN et de l'INSEE ou d'enquêtes auprès des organismes professionnels.

Procédé	Produit	Production (Mt)
Broyage du calcaire	Calcaire	
Calcination du calcaire	Chaux vive	
Broyage et extinction de la chaux vive	Chaux éteinte fine	

Source : [CEREN, 2006]

Tableau 13: Production de l'industrie de la chaux en France en Mt

**Les données de production cas du reste de l'Europe**

Pays	Produits	Production (Mt)
Autriche	Chaux vive	0,533
	Chaux éteinte	0,485
Belgique	Chaux vive	1,925
	Chaux éteinte	1,750
Suisse	Chaux vive	0,000
	Chaux éteinte	0,000
Chypre	Chaux vive	0,000
	Chaux éteinte	0,000
République Tchèque	Chaux vive	1,443
	Chaux éteinte	1,312
Allemagne	Chaux vive	8,150
	Chaux éteinte	7,409
Danemark	Chaux vive	0,770
	Chaux éteinte	0,700
Estonie	Chaux vive	0,022
	Chaux éteinte	0,020
Espagne	Chaux vive	1,676
	Chaux éteinte	1,524
Finlande	Chaux vive	0,627
	Chaux éteinte	0,570
Grèce	Chaux vive	0,407
	Chaux éteinte	0,370
Hongrie	Chaux vive	0,548
	Chaux éteinte	0,499
Irlande	Chaux vive	0,000
	Chaux éteinte	0,000
Islande	Chaux vive	0,000
	Chaux éteinte	0,000
Italie	Chaux vive	3,850
	Chaux éteinte	3,500
Lituanie	Chaux vive	0,110
	Chaux éteinte	0,100
Luxembourg	Chaux vive	0,000
	Chaux éteinte	0,000
Lettonie	Chaux vive	0,022
	Chaux éteinte	0,020
Malte	Chaux vive	0,000
	Chaux éteinte	0,000
Pays-Bas	Chaux vive	5,327
	Chaux éteinte	4,843
Norvège	Chaux vive	0,044
	Chaux éteinte	0,040
Pologne	Chaux vive	2,912
	Chaux éteinte	2,647
Portugal	Chaux vive	0,262
	Chaux éteinte	0,238
Roumanie	Chaux vive	0,000
	Chaux éteinte	0,000

Suède	Chaux vive	0,407
	Chaux éteinte	0,370
Slovénie	Chaux vive	0,165
	Chaux éteinte	0,150
Slovaquie	Chaux vive	0,898
	Chaux éteinte	0,816
Royaume-Uni	Chaux vive	2,750
	Chaux éteinte	2,500

**Tableau 14: Production de l'industrie de la chaux pour le reste de l'Europe en Mt**

### 2.3.3. Les consommations énergétiques

#### 2.3.3.1. Consommation de Combustibles par usage final le cas de la France

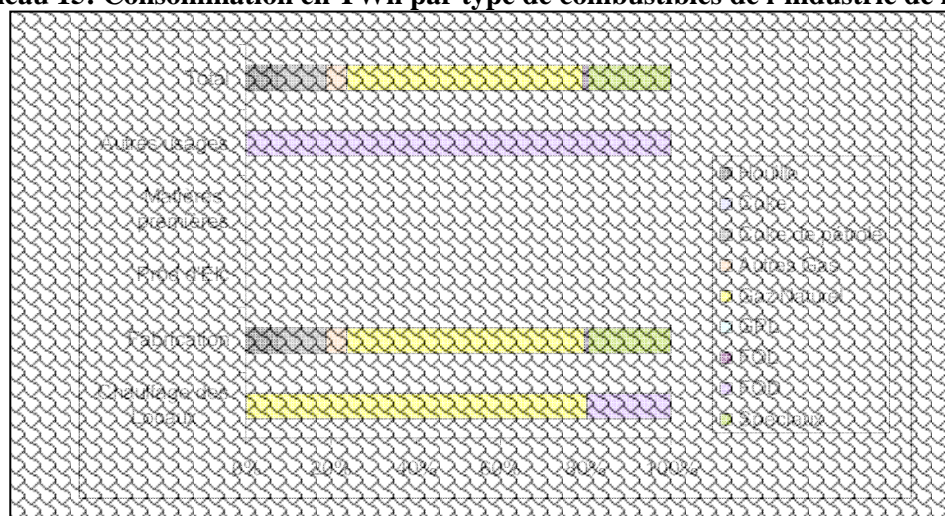
La consommation de combustibles du secteur de la chaux s'élève à 3,322 TWh. Elle représente 2% de l'ensemble des IGCE.

Les principales formes d'énergie utilisées sont variées : prédominance du gaz naturel, les spéciaux et le coke de pétrole. Les principaux combustibles consommés sont les suivants :

- le gaz naturel, avec 56% de la consommation totale des combustibles,
- les combustibles spéciaux, avec 20% de la consommation totale des combustibles,
- le coke de pétrole, avec 11% de la consommation totale des combustibles,
- la houille, avec 10% de la consommation totale des combustibles.

Segment	Opérations	Combustibles							
		Houille	Coke de pétrole	Autres Gaz	Gaz Naturel	FOL	FOD	Spéciaux	Total
Chaux	Hors chaudières								
	Sous chaudières								
	Total								

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 15: Consommation en TWh par type de combustibles de l'industrie de la chaux**

Réalisé à partir des données CEREN

**Figure 40: Répartition des consommations énergétiques par opération (hors chaudière)**



Chaux		
Spéciaux	Biomasse	0,142
	Autres combustibles spéciaux solides	0,140
	Graisses animales	0,056
	Huiles	0,181
	Autres combustibles spéciaux liquides	0,126
	Total	0,645

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 16: Consommation en TWh des spéciaux par type**

La consommation d'électricité représente 0,174 TWh dont 97% est utilisé pour l'énergie mécanique.

Segment	Usage								
	Eclairage	Energie mécanique	dont Air Comprimé	Electrolyse aqueuse	usage thermique	dont Chauffage des locaux	dont Production froid	Autres usage	Total
Chaux									

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 17: Consommation d'électricité par usage en TWh**

### Consommation énergétique des chaudières

Dans les consommations énergétiques sous chaudière, il apparaît que le gaz naturel est la seule énergie utilisée pour la production de chaleur.

Segment	Type	Nombre	Combustible	Consommation	Capacité	Disponibilité	Rendement	Age (ans)
Chaux	de chauffage central							
	autres							
Total								

Source : CEREN

**Tableau 18: Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières**

### Consommation énergétique des turbines

Segment	Type	Nombre	Capacité Installer	Electricité produite	Disponibilité	Age (ans)
Chaux	Turbine Hydraulique					

**Tableau 19: Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières**

### 2.3.3.2. Consommation de Combustibles par usage final le cas de l'Europe

Chaux (NACE 26.52)					
CSe	CSc	Élec	Comb	gaz	gaz
(kWh/t)	(kWh/t)	(GWh)	(GWh)	%	(GWh)
<b>Allemagne</b>					
66	963	489	7 135	19%	1 345
<b>Belgique</b>					
66	963	116	1 685	81%	1 365
<b>Pays-Bas</b>					
66	963	320	4 664	81%	3 778
<b>Espagne</b>					
66	963	101	1 467	75%	1 101
<b>Italie</b>					
66	963	231	3 371	81%	2 730
<b>Royaume-Uni</b>					
66	963	165	2 408	16%	389
<b>Portugal</b>					
66	963	16	229	81%	185
<b>Autriche</b>					
66	963	32	467	81%	378
<b>TOTAL 9 PAYS UE</b>					
66	963	1 675	24 440	56%	13 713
<b>Hongrie</b>					
66	963	33	480	81%	389
<b>Pologne</b>					
66	963	175	2 549	81%	2 065
<b>Slovaquie</b>					
66	963	54	786	81%	637
<b>République tchèque</b>					
66	963	87	1 263	81%	1 023
<b>TOTAL 4 PECO</b>					
66	963	348	5 079	81%	4 114

**Tableau 20: Consommations énergétiques du reste des pays européens**

### 3. Le plâtre

#### 3.1. Description et procédés de fabrication

La production du plâtre se base essentiellement sur le gypse, pierre naturelle, extraite des carrières et acheminé jusqu'au site de production. Les usines travaillent également avec le gypse de synthèse obtenu par désulfuration des fumées des centrales thermiques [Les industries du plâtre<sup>18</sup>].

Les matériaux brut subissent alors une première étape de concassage qui vise à réduire la dimension des blocs. Ensuite, ceux-ci sont criblés pour descendre la granulométrie à 50 mm.

Le Gypse est homogénéisé dans un grand hall en constituant des couches successives puis en le reprenant en croisant toutes les couches.

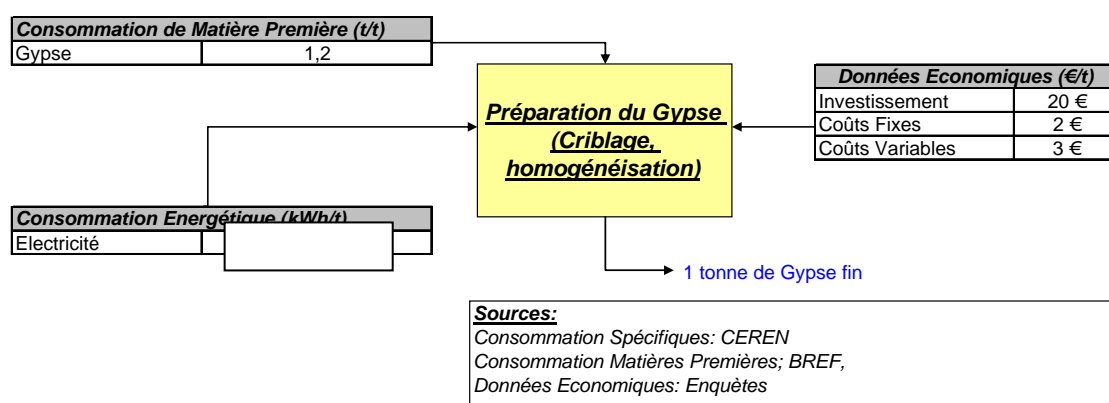


Figure 41: Données d'entrée du procédé de préparation du gypse

Le gypse est envoyé dans un broyeur cuiseur. Là, il est broyé par des boulets jusqu'à ce qu'il atteigne une granulométrie très fine.

Un courant d'air chaud emporte les particules vers le haut du four en les cuisant à 150°C environ pour former du semi-hydrate. Les grosses particules, quant à elles, restent en bas jusqu'à ce qu'elles soient suffisamment fines pour être entraînées.

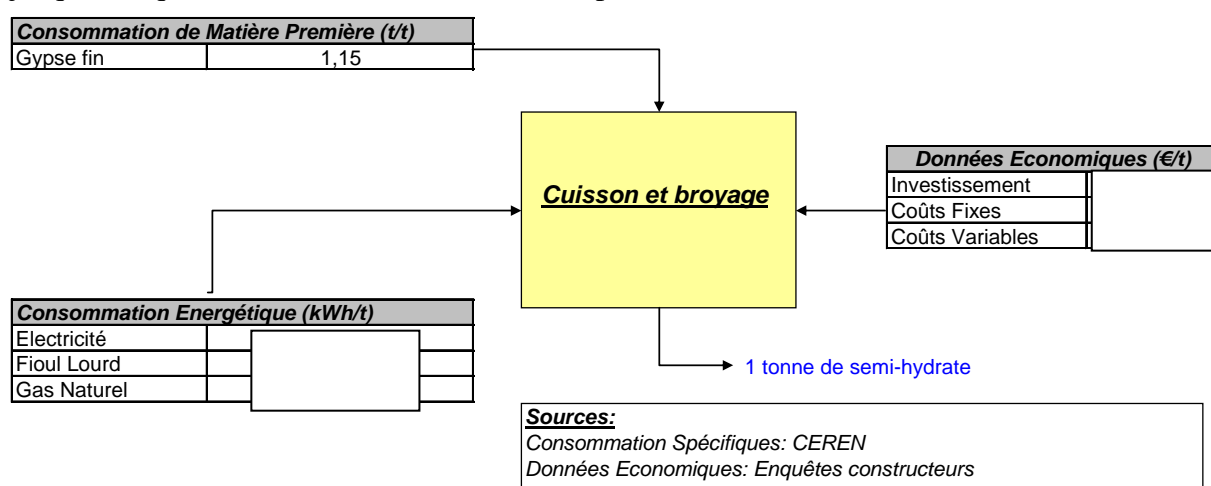


Figure 42: Données d'entrée du procédé de production du semi-hydrate (four à broyeur)

<sup>18</sup> [http://www.lesindustriesduplatre.org/platre\\_fabrication.php](http://www.lesindustriesduplatre.org/platre_fabrication.php)

Le plâtre est ensuite mélangé dans un malaxeur avec de l'eau et plusieurs additifs : de l'amidon pour améliorer la liaison entre le plâtre et le carton, des retardateurs afin de modifier le temps de prise ainsi que des adjuvants.

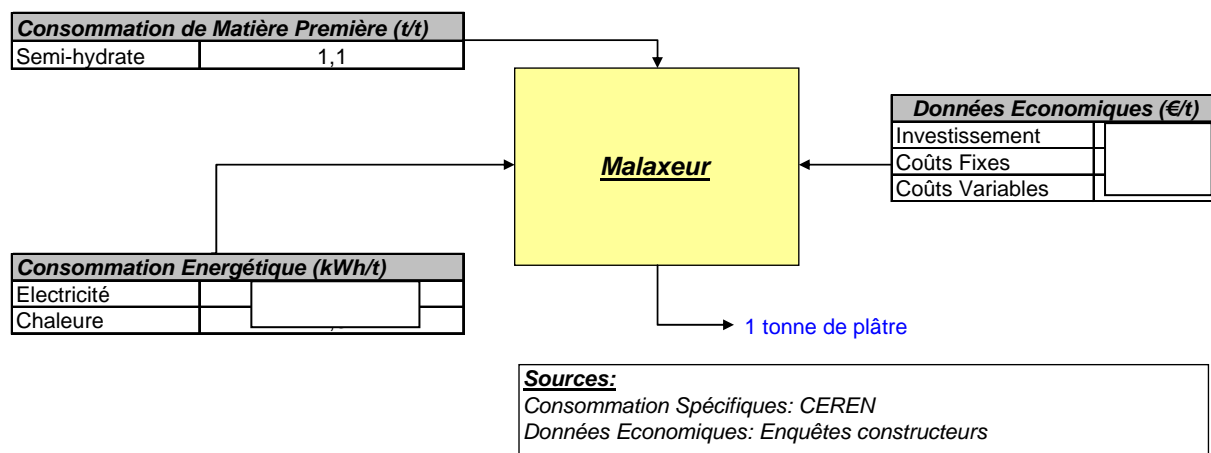


Figure 43: Données d'entrée du procédé de production du plâtre (malaxeur)

### 3.2. Le Système Energétique de Référence (RES)

Dans un cadre global, notre étude se base sur le système énergétique de référence (RES) ci-dessous. Le système énergétique de référence est adapté de manière à donner une représentation claire cohérente avec une interaction de plusieurs paramètres techniques et économiques. La conception du RES a été fixée par l'intérêt accordé à chaque atelier en termes de consommation énergétique et d'émissions de CO<sub>2</sub>.

En France le système énergétique appliqué est décrit comme suit (Figure 44).

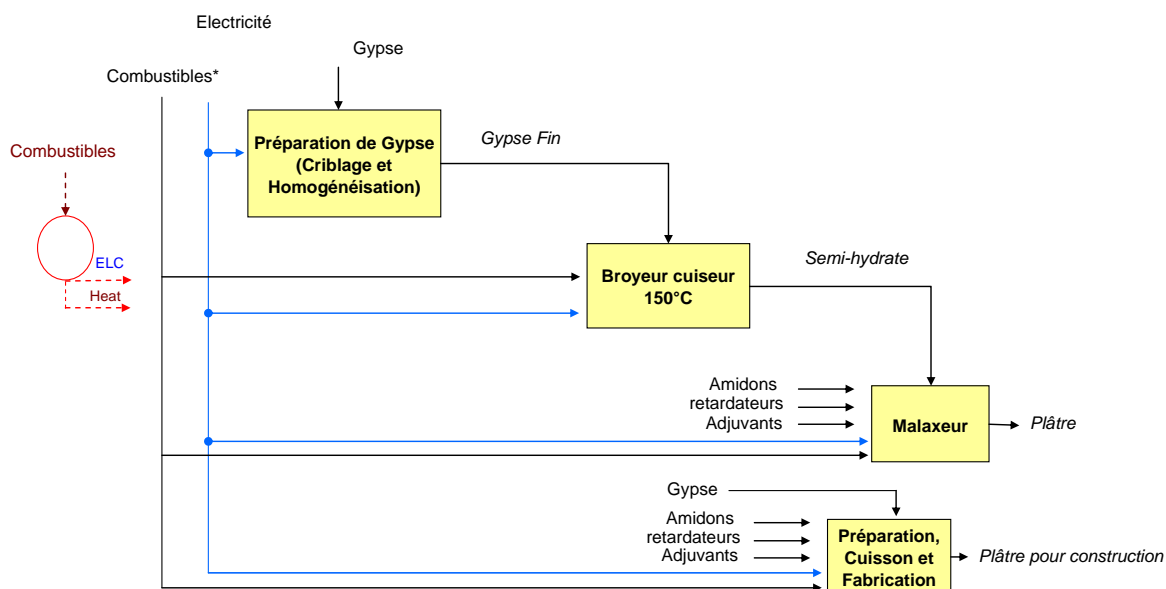


Figure 44: Le système énergétique de référence pour la chaux : cas de la France

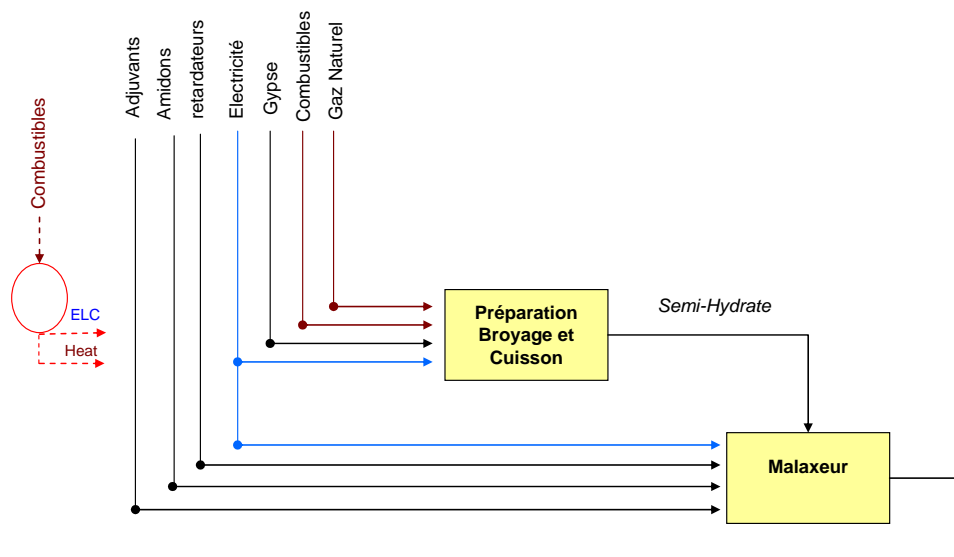


Figure 45: Le système énergétique de référence pour la chaux : cas de l'Europe

### 3.3. Les données Statistiques utilisées comme entrées du modèle

#### 3.3.1. Les nouvelles technologies

Dans l'industrie du plâtre il n'existe pas réellement de nouvelles technologies. Par conséquent, nous avons reconduit les hypothèses retenues dans le cadre de l'industrie du ciment avec des améliorations de consommations énergétiques par tranche de temps.

Plâtre				
Année	2020	2030	2040	2050
CS <sup>19</sup> électricité (kWh/t)				
CS Combustibles (kWh/t)				

Source : [Escarnot, 2006]

Tableau 21: Améliorations globales pour l'industrie du Plâtre en France

#### 3.3.2. Les données de production

##### Les données de production cas de la France

Les données répertoriées ci-dessous concernent le secteur du plâtre (265 E). Les données de production proviennent du SESSI, du CEREN et de l'INSEE ou d'enquêtes auprès des organismes professionnels.

Produit	Production (Mt)
Plâtre	2,146
Semi-hydrate	2,361
Gypse Fin	2,715
Plâtre pour construction	188,790 10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>

Tableau 22: Production de l'industrie du plâtre en France en Mt

<sup>19</sup> Consommation spécifique

**Les données de production cas du reste de l'Europe**

Pays	Produits	Production (Mt)
Autriche	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Belgique	Semi-hydrate	0,490
	Plâtre	0,445
Suisse	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Chypre	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
République Tchèque	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Allemagne	Semi-hydrate	2,748
	Plâtre	2,498
Danemark	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Estonie	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Espagne	Semi-hydrate	4,467
	Plâtre	4,061
Finlande	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Grèce	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Hongrie	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Irlande	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Islande	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Italie	Semi-hydrate	0,764
	Plâtre	0,694
Lituanie	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Luxembourg	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Lettonie	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Malte	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Pays-Bas	Semi-hydrate	0,770
	Plâtre	0,700
Norvège	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Pologne	Semi-hydrate	0,266
	Plâtre	0,241
Portugal	Semi-hydrate	0,309
	Plâtre	0,281
Romanie	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Suède	Semi-hydrate	0,000

	Plâtre	0,000
Slovénie	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Slovaquie	Semi-hydrate	0,000
	Plâtre	0,000
Royaume-Uni	Semi-hydrate	0,220
	Plâtre	0,200

**Tableau 23: Production de l'industrie du plâtre pour le reste de l'Europe en Mt**

### 3.3.3. Les consommations énergétiques

#### 3.3.3.1. Consommation de Combustibles par usage final le cas de la France

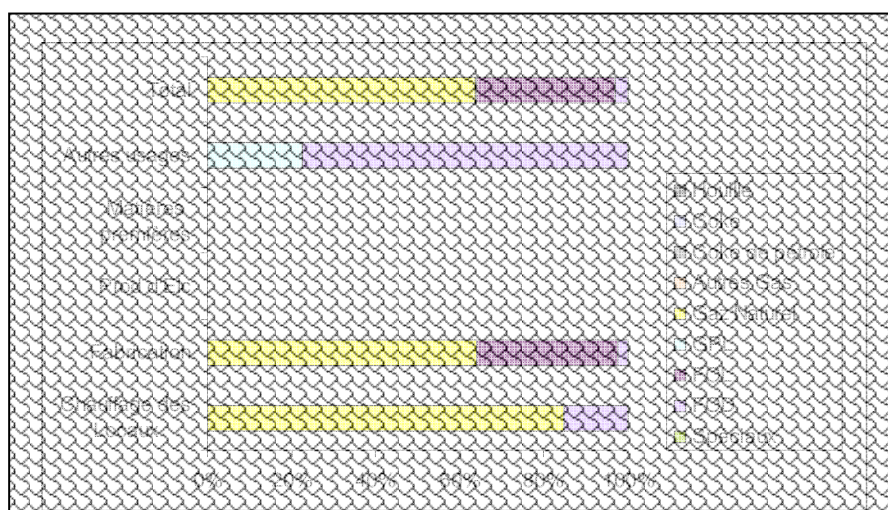
##### Le plâtre

La consommation de combustibles du secteur du plâtre s'élève à 0,222 TWh. Les principales formes d'énergie utilisées sont variées : prédominance du gaz naturel et du fioul lourd. le gaz naturel, avec 65% de la consommation totale des combustibles,

- le fioul lourd, avec 32% de la consommation totale des combustibles,

Segment	Opérations	Combustibles				
		Gaz Naturel	GPL	Fioul Lourd	Fioul Domestique	Total
Plâtre (265E)	Hors chaudières					
	Sous chaudières					
	Total					

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 24: Consommation en TWh par type de combustibles de l'industrie du plâtre**

Réalisé à partir des données CEREN

**Figure 46: Répartition des consommations énergétiques par opération (hors chaudière)**

La consommation d'électricité représente 0,032 TWh dont 90% est utilisé pour l'énergie mécanique.

Segment	Usage							
	Eclairage	Energie mécanique	dont Air Comprimé	usage thermique	dont Chauffage des locaux	dont Production froid	Autres usage	Total
Plâtre (265E)								

Tableau 25: Consommation d'électricité par usage en TWh

**Consommation énergétique des chaudières**

Segment	Type	Nombre	Combustible	Consommation	Capacité Installer	Disponibilité	Rendement	Age (ans)
Plâtre (265E)	de chauffage central							
	à tubes de fumée							
Total								

Source : CEREN

Tableau 26: Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières

**Le plâtre pour construction**

La consommation de combustibles du secteur du plâtre pour la construction s'élève à 2 TWh. Les principales formes d'énergie utilisées sont variées : prédominance du gaz naturel. Les principaux combustibles consommés sont les suivants :

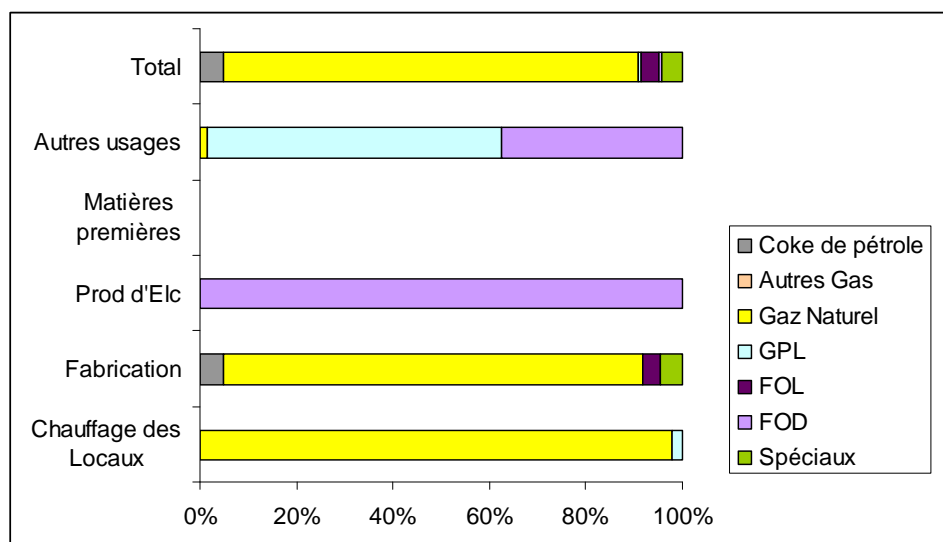
- le gaz naturel, avec 87% de la consommation totale des combustibles,
- le coke de pétrole, avec 5% de la consommation totale des combustibles,
- le fioul lourd, avec 3% de la consommation totale des combustibles.

Segment	Opérations	Combustibles						
		Coke de pétrole	Gaz Naturel	GPL	FOL	FOD	Spéciaux	Total
Plâtre pour construction (266C)	Hors chaudières							
	Sous chaudières							
	Total							

Source : [CEREN, 2006]

Tableau 27: Consommation en TWh par type de combustibles de l'industrie du plâtre pour construction





Réalisé à partir des données CEREN

**Figure 47: Répartition des consommations énergétiques par opération (hors chaudière)**

La consommation d'électricité représente 0,225 TWh dont 86% est utilisé pour l'énergie mécanique.

Segment	Usage							
	Eclairage	Energie mécanique	dont Air Comprimé	usage thermique	dont Chauffage des locaux	dont Production froid	Autres usage	Total
Plâtre Const (266C)								

**Tableau 28: Consommation d'électricité par usage en TWh**

### 3.3.3.2. Consommation de Combustibles par usage final le cas de l'Europe

Plâtre (NACE 26.53)					
CSe	CSc	Élec	Comb	gaz	gaz
(kWh/t)	(kWh/t)	(GWh)	(GWh)	%	(GWh)
<b>Allemagne</b>					
80	581	200	1 452	27%	397
<b>Belgique</b>					
80	581	36	259	65%	168
<b>Pays-Bas</b>					
80	581	56	407	65%	264
<b>Espagne</b>					
80	581	325	2 361	65%	1 535
<b>Italie</b>					
80	581	56	404	65%	262
<b>Royaume-Uni</b>					
80	581	16	116	20%	24
<b>Portugal</b>					
80	581	22	163	65%	106

<b>Autriche</b>					
80	581	0	0	65%	0
<b>TOTAL 9 PAYS UE</b>					
80	581	912	6 631	56%	3 711
<b>Hongrie</b>					
80	581	0	0	65%	0
<b>Pologne</b>					
80	581	19	140	65%	91
<b>Slovaquie</b>					
80	581	0	0	65%	0
<b>République tchèque</b>					
80	581	0	0	65%	0
<b>TOTAL 4 PECO</b>					
80	581	19	140	65%	91

**Tableau 29: Consommations énergétiques du reste des pays européens**

## Bibliographie

**[Bolwerk, 2006]**

Bolwerk R., Co- processing of waste and energy efficiency by cement plants, 2006.

**[BREF, 2001]**

Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries, 2001.

**[Calcia, 2006]**

Ciment Calcia, La fabrication du ciment, 2006

<http://ciments-calcia.info/fr/autres/publications/FabricationCiment.pdf>

**[CEMBUREAU, 1997]**

Les combustibles de substitution dans la production du ciment, bilan technique et écologique, cembureau, 1997

**[CEMBUREAU, 1999]**

Environmental Benefits of Using Alternative Fuels in Cement Production, A life-cycle approach, 1999.

**[CEMBUREAU, 2006a]**

Ciment & lime BREF Revision cembureau contribution, specific energy consumption, 2006.

**[CEMBUREAU, 2006b]**

Rapport d'activité, 2006.

**[CEREN, 2000]**

CEREN, Le profil énergétique du secteur des matériaux de construction et du verre, enquête par enquêteurs EMIE, 2000.

**[CEREN, 2006]**

Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie, Le profil énergétique du secteur des matériaux de construction et du verre, Secteur E19 – E20 – E21 – E22, Enquête par enquête, EMIE 2004, 2006.

**[Coito, 2005]**

Coito F., et al., Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Case Study of the California Cement Industry, 2005.

**[Escarnot, 2007]**

Escarnot B., Escudero M., Bethenod C., Hita A., Pham-Van-Cang C., Morisset V., Prévisions de consommation d'électricité et de gaz naturel des industries grandes consommatrices d'énergie en France, Rapport technique interne à EDF, Eco-efficacité et Procédés industriels, Expertise Clients et Secteurs Industriels, 2007.

**[EuLA]**

European Lime Association, [www.eula.be](http://www.eula.be)

**[Hauser, 2006]**

Hauser C., Fiche sectorielle fabrication de ciment, note interne EDF, 2006,

**[Hitchens, 2001]**

Hitchens D., et al., The Impact of Best Available Techniques (BAT) on the Competitiveness of European Industry, European Commission, 2001.

**[Holderbank, 1993]**

Holderbank Consulting, Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada, 1993.

**[Jaccard & Willis, 1996]**

Jaccard, M.K.& Associates and Willis Energy Services Ltd., Industrial Energy End-Use Analysis and Conservation Potential in Six Major Industries in Canada, 1996.

**[Jaume, 2004]**

Jaume R., Voies MDE dans le secteur du ciment, note interne EDF, 2004,

**[Martin, 1999]**

Martin N., Worrell E., Price L., Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions Reduction Opportunities in the U.S. Cement Industry, Environmental Energy Technologies Division, 1999.

**[Navarro, 2004]**

Navarro A., Déchets en cimenterie, techniques de l'ingénieur, 2004,

**[PEEIC, 2001]**

Guide d'évaluation de la consommation d'énergie : Production de ciment clinker, PEEIC, 2001.

**[Ruth, 2000]**

Ruth M., Worrell E., Price L., Evaluating Clean Development Mechanism Projects in the Cement Industry Using a Process-Step Benchmarking Approach, Energy Analysis Department, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 2000.

**[Sirchis, 2005]**

Sirchis J., Energy Efficiency in the Cement Industry, Directorate-General for Energy, Commission of the European Communities, Elsevier Applied Science, 2005.

**[U.S. EPA, 2007]**

U.S. Environmental Protection Agency, Energy Trends in Selected Manufacturing Sectors: Opportunities and Challenges for Environmentally Preferable Energy Outcomes, Final Report, 2007.

**[Venkateswaran, 1988]**

Venkateswaran, S.R., Lowitt H.E., The U.S. Cement Industry, An Energy Perspective, U.S. Department of Energy, 1988.

**[Wagner, 2000]**

Wagner H. et al., The European cement industry, back ground assessment For the IPTS BAT-Competitiveness Project, 2000.

**[William, 2003]**

William T., Energy and Emission Reduction Opportunities for the Cement Industry, U.S. Department of energy, Energy efficiency and Renewable Energy, 2003.

**[Worrell, 2004]**

Worrell E., Galitsky C., Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers, Environmental Energy Technologies Division, 2004.

**[Young, 2002]**

Young, G., Personal communication from Gerald I., Penta Engineering Corporation, 2002. [www.penta.net](http://www.penta.net)

---

## ***AVERTISSEMENT***

**Pour des raisons de confidentialité et de droit de reproduction de données technico-économiques, EDF R&D a souhaité masquer certaines données dans la présentation des secteurs industriels, en particulier les données CEREN, ULCOS et interne EDF.**

---

---

## ***ANNEXE IV***

## ***L'INDUSTRIE DU VERRE***

---

**TABLE DES MATIERES****➤ SOMMAIRE GENERAL**

<b>1. LE VERRE .....</b>	<b>369</b>
1.1. DESCRIPTION DU SECTEUR .....	369
1.1.1. <i>Le verre en quelques chiffres.....</i>	369
1.1.2. <i>Description et procédés de fabrication .....</i>	370
1.2. LE SYSTEME ENERGETIQUE DE REFERENCE (RES) .....	377
1.3. LES DONNEES STATISTIQUES UTILISEES COMME ENTREES DU MODELE .....	378
1.3.1. <i>Les nouvelles technologies .....</i>	378
1.3.2. <i>Les données de production .....</i>	379
1.3.3. <i>Les consommations énergétiques .....</i>	382
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>387</b>

**➤ TABLEAUX**

Tableau 1: Production mondiale du verre pour l'Europe-27 en Mt.....	369
Tableau 2 : Verre et articles en verre, parts de marché des principaux pays exportateurs .....	369
Tableau 3: Améliorations globales pour l'industrie du verre en France.....	379
Tableau 4: Production de l'industrie du verre en France en Mt .....	379
Tableau 5: Production de l'industrie du verre pour le reste de l'Europe en Mt.....	381
Tableau 6: Consommation en TWh par type de combustibles de l'industrie du verre.....	382
Tableau 7: Répartition des consommations énergétiques par opération (hors chaudière).....	383
Tableau 8: Consommation d'électricité par usage en TWh .....	384
Tableau 9: Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières .....	384
Tableau 10: Consommations énergétiques du reste des pays européens.....	386

**➤ FIGURES**

Figure 1: Schéma sommaire sur l'industrie du verre.....	371
Figure 2: principe de fabrication du verre plat .....	372
Figure 3: Données d'entrée d'un procédé de production du verre plat .....	373
Figure 4: principe de fabrication du verre creux .....	373
Figure 5: Données d'entrée d'un procédé de production du verre creux.....	374
Figure 6: Données d'entrée d'un procédé de production du verre creux à base du verre recyclé .....	375
Figure 7: principe de fabrication du verre technique.....	375
Figure 8: Données d'entrée d'un procédé de production des verres spéciaux.....	376
Figure 9: principe de fabrication de la fibre de verre .....	376
Figure 10: Données d'entrée d'un procédé de production de fibres de verre .....	377
Figure 11: Le système énergétique de référence pour l'industrie du verre .....	378

## 1. Le Verre

De nombreux éléments relatifs à la description des nouvelles technologies de cette annexe proviennent directement du document de référence sur les meilleures techniques disponibles (BREF : Best REFERencies). Pour de plus amples informations nous vous invitons à vous rendre sur le site de l'INERIS : <http://www.ineris.fr/aida/>.

### 1.1. Description du secteur

#### 1.1.1. Le verre en quelques chiffres<sup>1</sup>

En 2007, la production européenne a enregistré une augmentation de 3% par rapport à l'année précédente soit 35,46 Mt contre 34,43 Mt en 2006. Les 27 États membres de l'Union européenne représentent plus d'un quart de la production mondiale.

Types de verre	Verre creux	Verre plat	Verre de table	Fibres de verre	Autres (dont spéciaux)	Total
Production	21,624	10,262	1,534403	0,815	1,222	35,457
Consommation	21,027	10,301	1,618844	1,044	1,227	35,218
Exportation Extra-UE	0,997	1,074	0,389635	0,214	0,472	3,147
Importation Extra-UE	0,400	1,114	0,474076	0,443	0,478	2,909

Source : Eurostat

**Tableau 1: Production européenne de verre pour l'Europe-27 en Mt**

En France, la production globale de l'industrie du verre a été en 2007 de 5,588 Mt soit un 1% de moins que l'année précédente. La France demeure le second producteur en Europe derrière l'Allemagne.

Pays	%
Allemagne	13,2
États-Unis	9,1
Japon	8,6
France	8,6
Chine	7,0
Benelux-Luxembourg	6,8
Italie	6,2

Source : CHELEM-CEPII<sup>2</sup>

**Tableau 2 : Verre et articles en verre, parts de marché des principaux pays exportateurs**

Le verre plat a enregistré en 2007 une production nationale de 1,154 Mt contre 1,151 en 2006. La production de verre plat est destinée à 53% au marché du bâtiment et 47% pour l'automobile.

Au cours de la même année, le verre creux a enregistré une production de 4,149 Mt contre 4,234 en 2006. Les deux sous secteurs représentent les parts les plus importantes de la

<sup>1</sup> Cette partie a été réalisée à partir des données statistiques du syndicat français de l'industrie du verre pour la France ([www.fedeverre.fr](http://www.fedeverre.fr)) et le comité permanent des industries du verre européennes (CIPV) ([www.cpviglass.be](http://www.cpviglass.be)).

<sup>2</sup> CEPII (Centre d'études prospectives et d'informations internationales), CHELEM (Comptes Harmonisés sur les Echanges et L'Economie Mondiale). <http://www.cepii.fr/>, [www.cepii.fr/francgraph/bdd/chelem.htm](http://www.cepii.fr/francgraph/bdd/chelem.htm).



production de verre, soit plus de 90%.

### 1.1.2. Description et procédés de fabrication<sup>3</sup>

Cette section décrit les procédés et les techniques de fabrication, généralement utilisés dans l'industrie du verre. La plupart des procédés rentrent dans les cinq étapes de fabrication suivantes : traitement des matières premières, fusion, formage, recuisson (traitement en aval) et le façonnage.

L'étape essentielle dans la fusion du verre est la fusion des différentes matières premières, à haute température, pour créer du verre liquide.

**Préparation des matières première** : Le sable est la principale matière première, intervenant dans la fabrication du verre car il constitue la plus importante source de  $\text{SiO}_2$ . Il s'agit d'une substance courante. Mais la plupart du sable disponible n'est pas suffisamment pur, pour être utilisé dans la production de verre. Le point de fusion du sable est trop élevé, pour que la fusion soit économique et généralement, il faut ajouter un fondant, tel que l'oxyde de sodium, pour réduire la température de fusion [BREF, 2001].

D'autres matières sont ajoutées au verre afin de renforcer et d'en améliorer sa structure physique et chimique : l'oxyde de calcium, les oxydes de plomb, Le trioxyde de bore, etc....

Les matières premières sont transférées dans des silos intermédiaires, dans lesquels elles sont pesées, souvent de façon automatique, pour obtenir un « lot » parfaitement équilibré. Le « lot » est ensuite mélangé et acheminé vers la zone de four pour être fusionnées.

**La fusion** : La fusion, c'est-à-dire le mélange des matières premières à haute température pour obtenir le verre fondu, est le procédé essentiel de la production de verre. Le verre peut être fondu de différentes façons en fonction du produit fini qu'on souhaite obtenir, de son utilisation finale, de la taille de l'usine et des facteurs commerciaux dominants. La formule du verre, les matières premières, la technique de fusion, le choix du combustible et la taille du four, dépendront de ces facteurs.

Les mélanges vitrifiables sont enfournés de façon continue à l'entrée du four à bassin. Les températures sont proches de  $1500^\circ\text{C}$  dans la zone de fusion. La *fusion* est suivie de l'*affinage* (à  $1400^\circ\text{C}$ ) qui consiste à débarrasser le verre fondu des gaz pouvant apparaître sous forme de bulles. Puis, vient l'opération de conditionnement thermique appelée *braise*, au cours de laquelle le verre est ramené à la température de formage. Le formage est réalisé tant que le verre est plastique.

Les fours généralement utilisés sont les suivants, avec inévitablement des exceptions [BREF, 2001] :

- Pour des installations à grande capacité,  $>500$  t/j, des fours régénératifs, à brûleurs transversaux sont généralement utilisés.
- Pour les installations de moyenne capacité, entre 100 et 500 t/j, des fours régénératifs, à flammes longitudinales sont préférés. Bien que l'on trouve également, selon les cas, des fours régénératifs à brûleurs transversaux, des fours à récupération, et des fours oxycombustion ou électriques.

---

<sup>3</sup> Cette partie est extraite du « document de référence sur les meilleures techniques disponibles dans l'industrie du verre, décembre 2001 » et une note interne à EDF « fiche sectorielle fabrication de verre et d'articles en verre, Jaume R., Hauser C., Meublât O., »

- Pour les petites installations, entre 25 et 100 t/j, on utilise généralement des fours à récupération, des fours régénératifs à flammes longitudinales et des fours oxycombustion ou électriques.

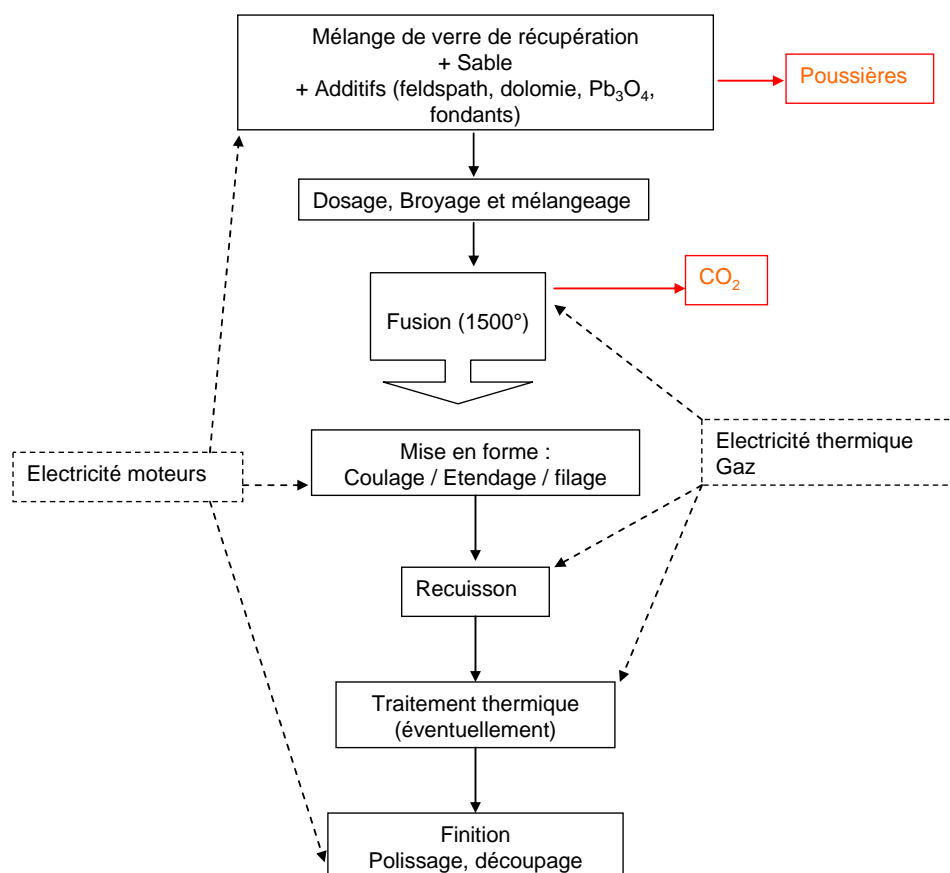
**Le formage** : flottage pour le verre plat, soufflage pour le verre creux, fibrage par centrifugation pour les fibres.

**La recuisson** : qui consiste à uniformiser la température des produits après fabrication et à éliminer les contraintes résiduelles qui pourraient les fragiliser. Elle s'opère dans des tunnels appelés arches (pour le verre creux) ou étenderies (pour le verre plat) dans lesquelles les produits cheminent sur des rouleaux ou des tapis.

**Le façonnage** : pour les verres qui ne sont qu'un demi-produit utilisable par le consommateur. Il existe 2 types de transformations : le *façonnage à chaud*, qui consiste à réchauffer un objet au moyen de brûleurs à gaz pour en modifier la forme, et le *façonnage à froid* qui consiste à tailler, graver ou assembler.

La fabrication du verre plat dit « sékurit » comporte une phase supplémentaire : **la trempe** qui donne des caractéristiques mécaniques particulières au produit. La grande majorité des fours de trempe sont électriques.

On peut résumer la fabrication des produits verriers par le schéma suivant :

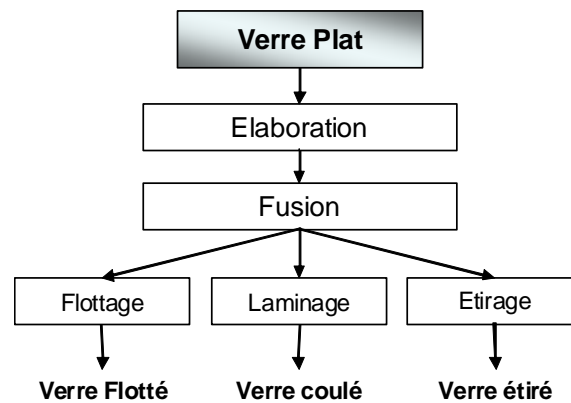


Source : [Jaume, 2006]

**Figure 1: Schéma sommaire de l'industrie du verre**

### ➤ Verre plat

Le terme verre plat inclut simplement tous les types de verre, ayant une forme plate, indépendamment du type de fabrication dont ils sont issus. Le verre plat est presque exclusivement produit dans des fours régénératifs à brûleurs transversaux. Parmi les types de verres plats on distingue les verres flottés (float) et les verres coulés.



**Figure 2: principe de fabrication du verre plat**

Le principe de base, du verre flotté, consiste à verser le verre en fusion sur un bain d'étain en fusion, en formant un ruban, dont la surface supérieure et inférieure deviennent parallèles, en vertu de la force de gravité et de la tension de surface.

Le bain ou cuve de float est constitué d'un tube en acier, soutenu par un châssis en acier, et intérieurement revêtu de blocs de matériau réfractaire, contenant l'étain fondu.

Le verre en fusion coule du four, à travers une goulotte revêtue de matériau réfractaire, qui peut être réchauffée, pour maintenir le verre à la bonne température. Arrivé au bout de la goulotte, le verre fondu se déverse sur le bain d'étain, à travers une lèvre de coulée réfractaire spéciale, qui assure une bonne répartition du verre. En passant sur la surface du bain, le verre adopte une épaisseur uniforme et devient presque aussi parfaitement plat que l'étain fondu.

Le verre coulé est obtenu grâce à un procédé continu à double cylindre. Le verre fondu à environ 1000°C, est écrasé entre deux cylindres en acier, refroidis à l'eau, pour créer un ruban, doté d'une certaine épaisseur contrôlée, et d'un motif imprimé sur la surface.

Le verre est transféré du fondoir à verre dans un avant-creuset, afin d'atteindre la température requise, en amont du passage du cylindre. Les rouleaux tirent le verre en fusion, à l'intérieur du passage, d'où il ressort sous forme de ruban, d'une certaine épaisseur, qui est définie par l'écart entre les rouleaux. La largeur moyenne du ruban est d'environ 2 mètres.

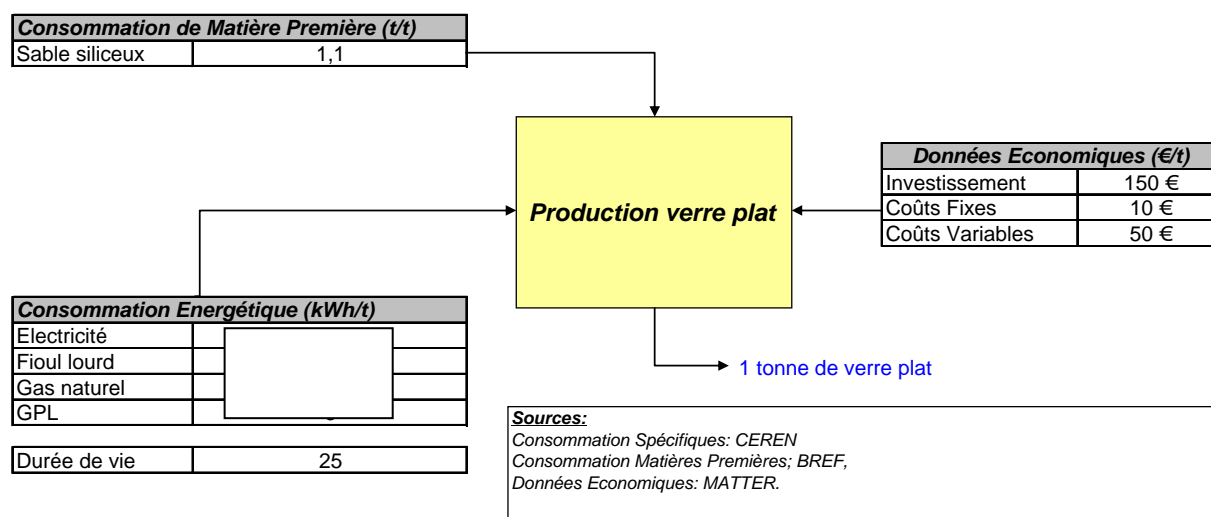


Figure 3: Données d'entrée d'un procédé de production du verre plat

### ➤ Verre creux (emballage)

Les verres d'emballage sont produits par un procédé de moulage, en deux phases, pendant lequel on applique des techniques d'estampage et de soufflage. Voici les étapes essentielles de la production automatisée d'une bouteille :

- Au départ, il y a un morceau de verre fluide (la paraison) ayant le bon poids et la bonne température.
- On moule la première forme dans un premier moule (moule d'ébauchage), en exerçant une pression avec de l'air comprimé ou un piston métallique.
- On transfère ensuite la première forme, paraison, dans le moule définitif (moule de finition).
- Le procédé de moulage est complété en soufflant de l'air comprimé sur le récipient pour lui donner la forme du moule définitif.
- Le produit fini est sorti du moule et soumis au traitement suivant.

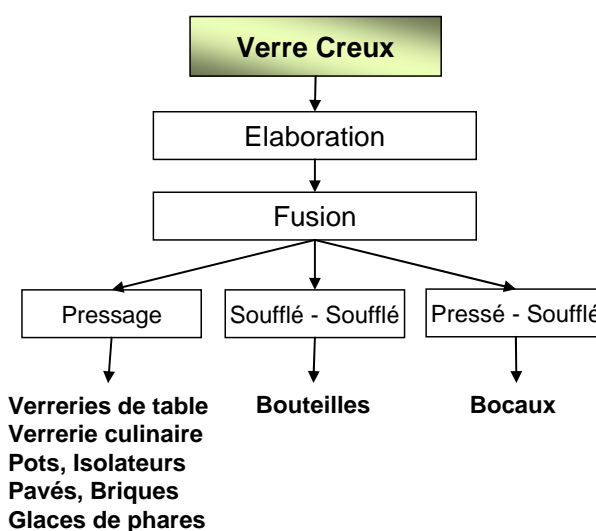


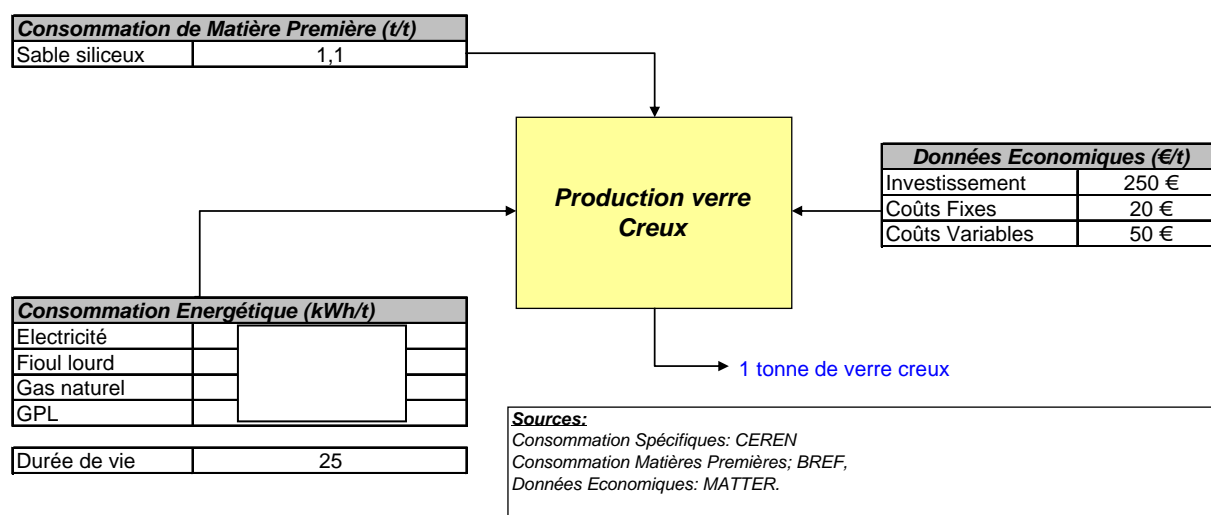
Figure 4: principe de fabrication du verre creux

Le verre liquide coule du four à travers l'avant-creuset, jusqu'à une goulotte d'évacuation, située à l'extrémité. En partant du fond de la goulotte, un à quatre flots parallèles de verre liquide sont formés, à travers les orifices adaptés. Ces flots de verre, modulés par un système de piston mécanique, sont découpés à la bonne longueur, par un mécanisme spécial, qui crée les premières paraisons, en forme de "saucisse". Les paraisons sont découpées simultanément à partir de flots de verre parallèles, et sont ensuite moulées simultanément, dans des moules placés sur la machine de formage.

Le procédé de formage comprend deux phases :

- Le formage initial du calque peut être effectué, soit par pression à l'aide d'un piston, soit par soufflage à l'air comprimé, selon le type d'emballage.
- L'opération de moulage final est toujours effectuée par soufflage, afin d'obtenir la forme creuse finie.

Ces deux phases du procédé sont, donc, appelées, respectivement : "pressé soufflé" et "soufflé soufflé". Les récipients ainsi formés sont ensuite soumis aux opérations de post-formage sur un convoyeur en continu.



**Figure 5: Données d'entrée d'un procédé de production du verre creux**

Dans le cas du verre creux la production peut être basée entre autre sur l'utilisation de verre usagé.

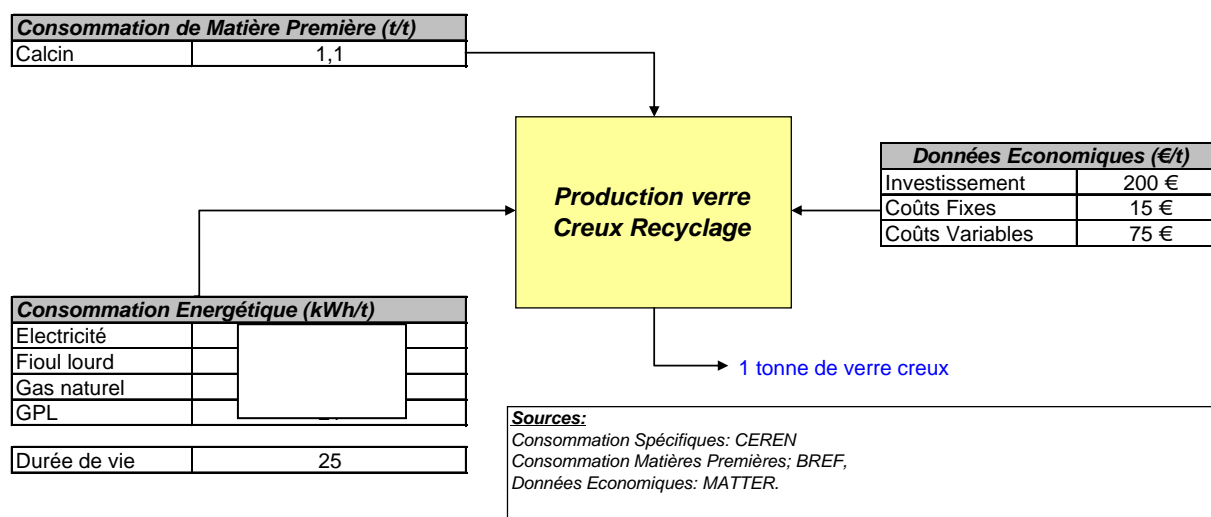


Figure 6: Données d'entrée d'un procédé de production du verre creux à base de verre recyclé

### ➤ Verre technique (spéciaux)

Le secteur de production des verres spéciaux est extrêmement varié et couvre une grande gamme de produits, de composition, de méthodes de fabrication et d'utilisation finale très différentes.

La grande diversité de ce secteur donne lieu à l'utilisation de plusieurs techniques de fusion différentes. Toutefois, les faibles volumes de production indiquent que la majorité des fours sont relativement petits. Les techniques les plus courantes sont les fours à récupération, les fours oxycombustion, les fours électriques et les réservoirs journaliers. Dans certains cas, les fours régénératifs sont également utilisés, par exemple pour la fabrication du verre pour tubes cathodiques et du silicate de sodium. Les températures de fusion des verres spéciaux peuvent parfois être plus élevées que pour des compositions traditionnelles de produits à gros volume de production.

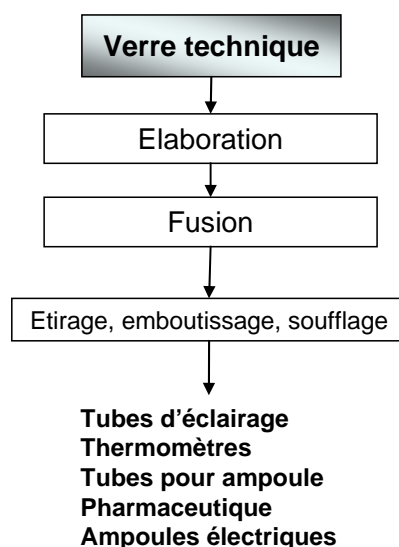


Figure 7: principe de fabrication du verre technique

Tout comme dans les autres procédés de production, après la fusion et la finition le verre en fusion coule directement du four à travers des avant-creusets, à température contrôlée, à l'intérieur des équipements de formage situés en aval.

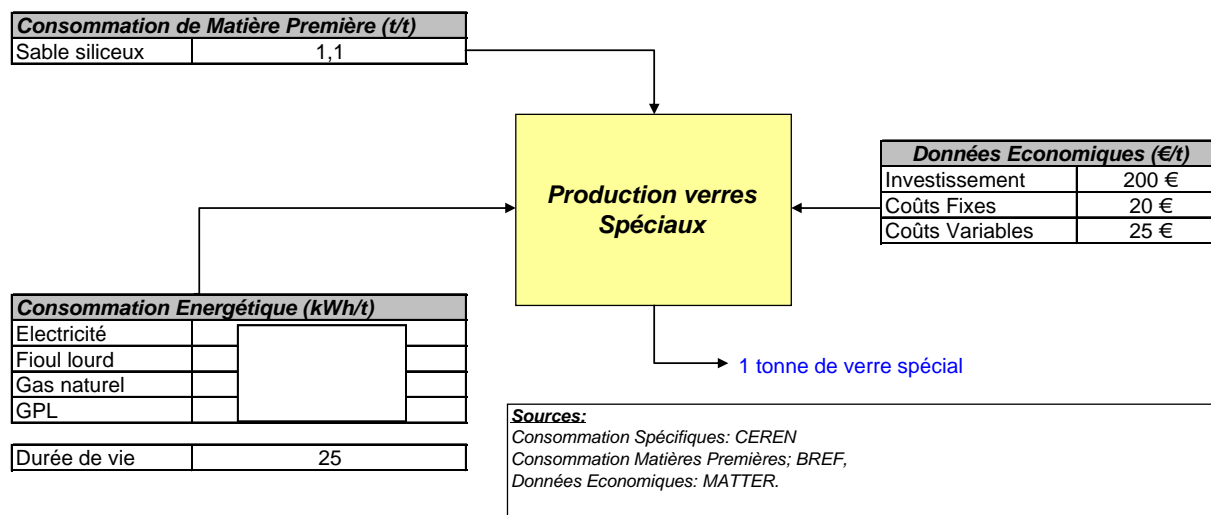


Figure 8: Données d'entrée d'un procédé de production de verres spéciaux

#### ➤ Fibres de verre<sup>4</sup>

On distingue 2 types de fibres :

- les fibres textiles ou de renforcement (fil continu)
- les fibres pour isolation (courtes et enchevêtrées).

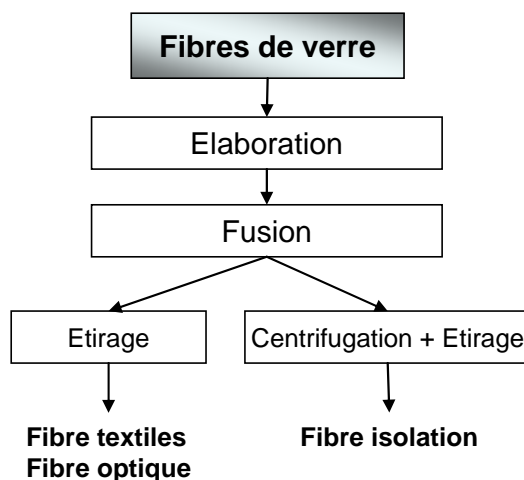


Figure 9: principe de fabrication de la fibre de verre

L'obtention de fibres textiles se fait par étirage à grande vitesse et fibrage du verre en fusion au travers d'une filière percée de trous. A la sortie de la filière, les filaments reçoivent un revêtement de surface protecteur qui a pour but d'agglomérer entre eux les filaments d'un

<sup>4</sup><http://www.infovitrail.com/verre/fibres-verre.php>  
<http://environnement.wallonie.be/enviroentreprises/pages/etatenviindustrie.asp?doc=syn-min-tec>

même fil, de les revêtir d'une pellicule lubrifiante et enfin de favoriser la liaison entre le verre et les résines synthétiques dans la fabrication du plastique armé.

Les fibres pour isolation se présentent sous la forme d'un enchevêtrement de fibres assez courtes constituant une sorte de matelas, souvent désigné sous le nom de « laine de verre ». Le matelas est considéré comme un isolant thermique.

Le verre utilisé pour les fibres doit pouvoir être fibré à une température plus basse que pour les verres courants et être encore moins sensible à l'action de l'humidité et aux agressions des agents atmosphériques. Entre donc, dans sa composition, des quantités importantes d'alumine et d'anhydride borique et pour beaucoup moins d'oxydes alcalin que pour les verres industriels courants.

Le procédé actuellement mis sur le marché a été imaginé et réalisé par la société Saint Gobain. Par l'orifice d'une cuvette, le verre fondu se déverse en continu dans une assiette de fibrage (en alliage métallique réfractaire). Cette assiette, chauffée aux environs de 1000° à 1100°C, tourne à très grande vitesse. Sa partie centrale est une couronne périphérique percée de milliers de trous par où le verre est chassé sous l'action de la force centrifuge. A la sortie de l'assiette, les fibres de verre sont étirées par des courants rapides de gaz chauds et elles subissent un ensimage parachevant ainsi leur fabrication.

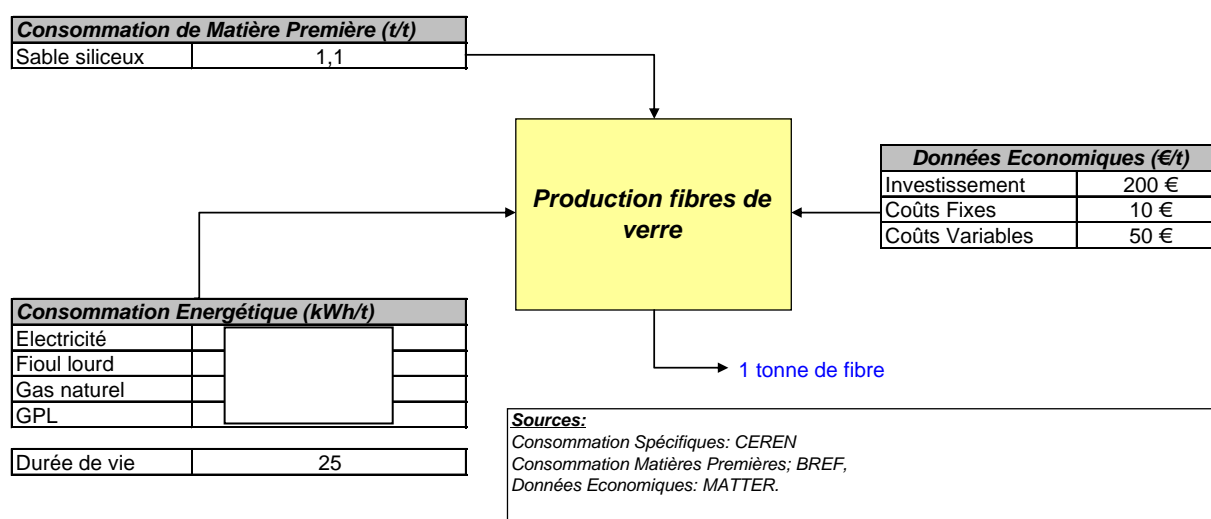


Figure 10: Données d'entrée d'un procédé de production de fibres de verre

## 1.2. Le Système Energétique de Référence (RES)

Dans un cadre global, notre étude se base sur le système énergétique de référence (RES) ci-dessous. Le système énergétique de référence est adapté de manière à donner une représentation claire cohérente avec une interaction de plusieurs paramètres techniques et économiques. La conception du RES a été fixée par l'intérêt accordé à chaque atelier en termes de consommation énergétique et les émissions de CO<sub>2</sub>.

Le système énergétique appliqué est représenté comme suit (Figure 11).



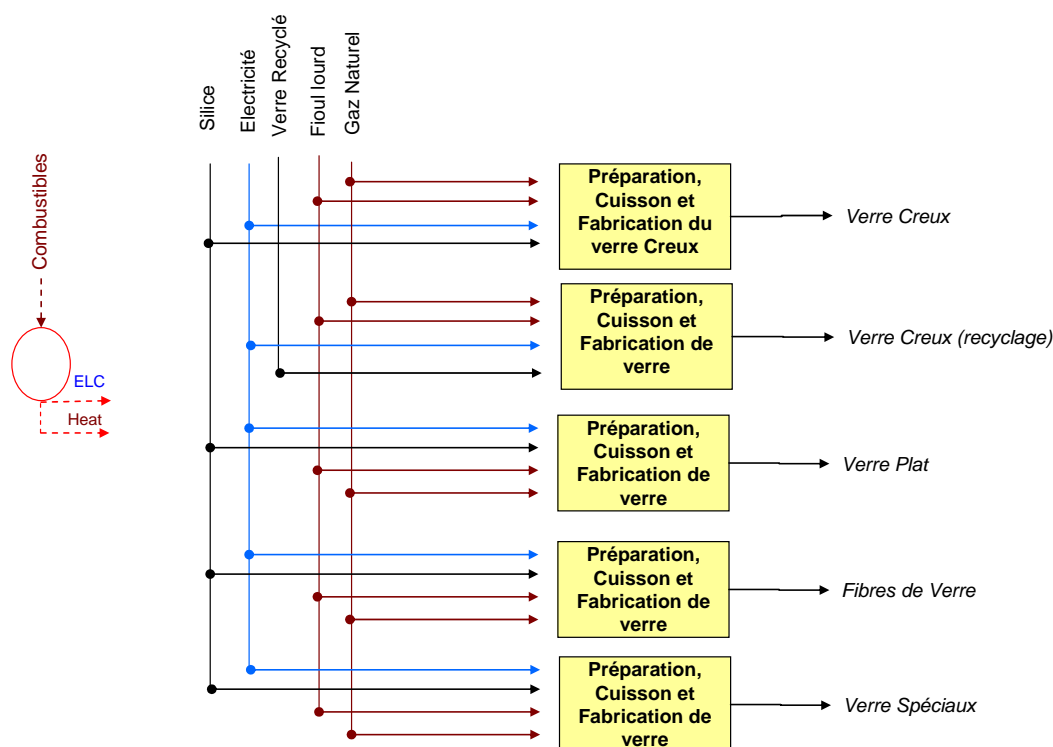


Figure 11: Le système énergétique de référence pour l'industrie du verre

### 1.3. Les données Statistiques utilisées comme entrées du modèle

#### 1.3.1. Les nouvelles technologies

Les choix des nouvelles technologies considérées concernent uniquement les fours de fusion, en remplaçant les fours classiques par des fours électriques :

- La durée de vie est de 15 ans,
- L'investissement représente 3 à 4 fois l'investissement classique (Voir Figure 3, Figure 5, Figure 6, Figure 8, Figure 10).
- Les consommations énergétiques sont uniquement de l'électricité ( $ConsoSpécifique_{ELC} = \sum ConsoSpécifique_{Comb} \times 0,9$ ).

#### Améliorations globales pour l'industrie du verre le cas de la France

Pour l'industrie du verre en France, les experts sectoriels d'EDF ont estimé certaines améliorations par tranche de temps. Les améliorations ont été estimées par rapport au procédé de base (de référence).

Année	2020	2030	2040	2050
	Verre plat			
Cs <sup>5</sup> électricité				
Cs Combustibles				
	Verre creux			
Cs électricité				
Cs Combustibles				
	Verre spécial			
Cs électricité				
Cs Combustibles				
	Fibres de verre			
Cs électricité				
Cs Combustibles				

Source : [Escarnot, 2006]

**Tableau 3: Améliorations globales pour l'industrie du verre en France**

### 1.3.2. Les données de production

#### Les données de production cas de la France

Les données répertoriées ci-dessous concernent le secteur du verre (Verre plat : 261(A, C), Verre creux : 261E, Fibres de verre : 261G, Verre technique : 261J). Les données de production proviennent du SESSI, CEREN et de l'INSEE ou des enquêtes auprès des organismes professionnels.

Produit	Production (Mt)
Verre plat	
Verre creux	
Fibre de verre	
Verre technique	

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 4: Production de l'industrie du verre en France en Mt**

#### Les données de production cas du reste de l'Europe<sup>6</sup>

Pays	Produits	Production (Mt)
Autriche	Verre plat	0,006
	Verre creux	1,249
	Fibres de verre	0,015
	Verre technique	0,036
Belgique	Verre plat	1,161
	Verre creux	0,125
	Fibres de verre	0,189
	Verre technique	0,105
Suisse	Verre plat	0,000

<sup>5</sup> Consommation spécifique

<sup>6</sup> La valeur 0 est la valeur intégrée dans le modèle, elle exprime le manque de la donnée dans certain cas.

	Verre creux	0,000
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
Chypre	Verre plat	0,000
	Verre creux	0,000
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
République Tchèque	Verre plat	0,000
	Verre creux	0,496
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,240
Allemagne	Verre plat	1,868
	Verre creux	4,367
	Fibres de verre	0,369
	Verre technique	0,474
Danemark	Verre plat	0,000
	Verre creux	0,300
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
Estonie	Verre plat	0,010
	Verre creux	0,010
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
Espagne	Verre plat	0,541
	Verre creux	1,684
	Fibres de verre	0,058
	Verre technique	0,000
Finlande	Verre plat	0,060
	Verre creux	0,080
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
Grèce	Verre plat	0,000
	Verre creux	0,110
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
Hongrie	Verre plat	0,153
	Verre creux	0,128
	Fibres de verre	0,014
	Verre technique	0,062
Irlande	Verre plat	0,000
	Verre creux	0,000
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
Islande	Verre plat	0,000
	Verre creux	0,000
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
Italie	Verre plat	1,009
	Verre creux	3,410
	Fibres de verre	0,135
	Verre technique	0,400
Lituanie	Verre plat	0,050

	Verre creux	0,050
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
Luxembourg	Verre plat	0,000
	Verre creux	0,000
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
Lettonie	Verre plat	0,010
	Verre creux	0,010
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
Malte	Verre plat	0,000
	Verre creux	0,000
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
Pays-Bas	Verre plat	0,150
	Verre creux	1,000
	Fibres de verre	0,100
	Verre technique	0,250
Norvège	Verre plat	0,000
	Verre creux	0,000
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
Pologne	Verre plat	0,423
	Verre creux	0,000
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
Portugal	Verre plat	0,078
	Verre creux	0,288
	Fibres de verre	0,003
	Verre technique	0,100
Romanie	Verre plat	0,000
	Verre creux	0,000
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
Suède	Verre plat	0,260
	Verre creux	0,120
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
Slovénie	Verre plat	0,030
	Verre creux	0,410
	Fibres de verre	0,000
	Verre technique	0,000
Slovaquie	Verre plat	0,000
	Verre creux	0,403
	Fibres de verre	0,126
	Verre technique	0,174
Royaume-Uni	Verre plat	0,800
	Verre creux	1,850
	Fibres de verre	0,270
	Verre technique	0,160

Tableau 5: Production de l'industrie du verre pour le reste de l'Europe en Mt

### 1.3.3. Les consommations énergétiques

#### 1.3.3.1. Consommation de Combustibles par usage final le cas de la France

Comme toutes les IGCE, la fabrication du verre est une activité à forte consommation d'énergie. Par conséquent, le choix de la source d'énergie, de la technique de réchauffement, sont autant d'éléments essentiels pour la conception du four. Ces mêmes éléments revêtent une importance cruciale pour l'environnement et la consommation d'énergie des installations de fusion. Les trois principales sources d'énergie, pour la fabrication du verre, sont le gaz, le fuel et l'électricité [BREF, 2001].

La consommation de combustibles du secteur du verre s'élève à 13,374 TWh. Elle représente 8% de l'ensemble des IGCE.

Les principales formes d'énergie utilisées sont variées : prédominance du gaz naturel et du fioul lourd.

Les principaux combustibles consommés sont les suivants :

- le gaz naturel, avec 8,3 TWh, soit 62% de la consommation totale des combustibles,
- le fioul lourd, avec 4,816 TWh, soit 36% de la consommation totale des combustibles,
- les combustibles spéciaux, avec 0,001 TWh, principalement de l'hydrogène.

Segment	Opérations	Combustibles						
		Coke	Gaz Naturel	GPL	FOL	FOD	Spéciaux	Total
Verre Plat	Hors chaudières							
	Sous chaudières							
	Total							
Verre Creux	Hors chaudières							
	Sous chaudières							
	Total							
Fibres de Verre	Hors chaudières							
	Sous chaudières							
	Total							
Verre Technique	Hors chaudières							
	Sous chaudières							
	Total							
Total	Hors chaudières							
	Sous chaudières							
	Total							

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 6: Consommation en TWh par type de combustibles de l'industrie du verre**

Segment	Usages	Combustibles (TWh)						
		Coke	Gaz Naturel	GPL	FOL	FOD	Spéciaux	Total
Verre Plat	Chauffage des Locaux							
	Fabrication							
	Production d'Electricité							
	Matières premières							
	Autres usages							
	Total							
Verre Creux	Chauffage des Locaux							
	Fabrication							
	Production d'Electricité							
	Matières premières							
	Autres usages							
	Total							
Fibres de Verre	Chauffage des Locaux							
	Fabrication							
	Production d'Electricité							
	Matières premières							
	Autres usages							
	Total							
Verre Technique	Chauffage des Locaux							
	Fabrication							
	Production d'Electricité							
	Matières premières							
	Autres usages							
	Total							
Total Verre	Chauffage des Locaux							
	Fabrication							
	Production d'Electricité							
	Matières premières							
	Autres usages							
	Total							



Réalisé à partir des données CEREN

**Tableau 7: Répartition des consommations énergétiques par opération (hors chaudière)**

La consommation d'électricité représente 3,53 TWh dont 59% est utilisé pour l'énergie mécanique et 37% pour les usages thermiques.

Segment	Usage								Total
	Eclairage	Energie mécanique	dont Air Comprimé	Electrolyse aqueuse	usage thermique	dont Chauffage des locaux	dont Production froid	Autres usage	
Verre Plat									
Verre Creux									
Fibres de Verre									
Verre Technique									
Total Verre									

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 8: Consommation d'électricité par usage en TWh**

### Consommation énergétique des chaudières

Dans les consommations énergétiques sous chaudière, il apparaît que le gaz naturel, représente la grande part des énergies consommées (87% du total des consommations sous chaudières et hors récupération). Le Fioul représente 13%. Les rendements associés aux chaudières sont comme suit : 95% pour le gaz naturel et 92% pour le fioul.

Segment	Type	Nombre	Combustible	Consommation	Capacité Installer	Disponibilité	Rendement	Age (ans)
Verre	à tubes de fumée							
	à tubes d'eau							
	de chauffage central							
	autres							
	à tubes de fumée							
	à tubes d'eau							
Total								

Source : CEREN

**Tableau 9: Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières**

### **1.3.3.2. Consommation de Combustibles par usage final le cas de l'Europe**

Verre							
	NACE	CSe	CSc	Élec	Comb	gaz	gaz
		(kWh/t)	(kWh/t)	(GWh)	(GWh)	%	(GWh)
Allemagne							
verre plat	26.11	195	2 227	364	4 160	89%	3 714
verre creux	26.13	473	2 179	2 066	9 515	61%	5 828
fibres de verre	26.14	1 897	3 619	700	1 336	78%	1 044
verre technique	26.15	1 615	7 324	765	3 471	46%	1 589

<b>Belgique</b>							
verre plat	26.11	195	2 227	226	2 585	63%	1 632
verre creux	26.13	473	2 179	59	272	63%	172
fibres de verre	26.14	1 897	3 619	358	684	88%	600
verre technique	26.15	1 615	7 324	170	769	91%	702
<b>Pays-Bas</b>							
verre plat	26.11	195	2 227	29	334	63%	211
verre creux	26.13	473	2 179	473	2 179	63%	1 373
fibres de verre	26.14	1 897	3 619	190	362	88%	318
verre technique	26.15	1 615	7 324	404	1 831	91%	1 671
<b>Espagne</b>							
verre plat	26.11	195	2 227	105	1 205	63%	761
verre creux	26.13	473	2 179	797	3 669	63%	2 311
fibres de verre	26.14	1 897	3 619	110	210	80%	168
verre technique	26.15	1 615	7 324	0	0	80%	0
<b>Italie</b>							
verre plat	26.11	195	2 227	197	2 247	63%	1 419
verre creux	26.13	473	2 179	1 613	7 430	63%	4 681
fibres de verre	26.14	1 897	3 619	256	489	88%	429
verre technique	26.15	1 615	7 324	646	2 930	91%	2 674
<b>Royaume-Uni</b>							
verre plat	26.11	195	2 227	156	1 781	90%	1 606
verre creux	26.13	473	2 179	875	4 030	50%	2 017
fibres de verre	26.14	1 897	3 619	512	977	100%	975
verre technique	26.15	1 615	7 324	258	1 169	44%	511
<b>Portugal</b>							
verre plat	26.11	195	2 227	15	173	84%	145
verre creux	26.13	473	2 179	136	627	63%	395
fibres de verre	26.14	1 897	3 619	5	9	88%	8
verre technique	26.15	1 615	7 324	161	732	82%	597
<b>Autriche</b>							
verre plat	26.11	195	2 227	1	12	63%	8
verre creux	26.13	473	2 179	591	2 721	63%	1 714
fibres de verre	26.14	1 897	3 619	28	54	88%	48
verre technique	26.15	1 615	7 324	58	262	91%	239
<b>TOTAL 9 PAYS UE</b>							
verre plat	26.11	195	2 227	1 262	14 413	74%	10 706
verre creux	26.13	473	2 179	8 664	39 904	61%	24 451
fibres de verre	26.14	1 897	3 619	2 555	4 876	87%	4 252
verre technique	26.15	1 615	7 324	2 641	11 980	73%	8 728
<b>Hongrie</b>							
verre plat	26.11	195	2 227	30	340	63%	214
verre creux	26.13	473	2 179	60	278	63%	175
fibres de verre	26.14	1 897	3 619	27	52	88%	46



verre technique	26.15	1 615	7 324	100	454	91%	415
<b>Pologne</b>							
verre plat	26.11	195	2 227	83	942	63%	595
verre creux	26.13	473	2 179	0	0	63%	0
fibres de verre	26.14	1 897	3 619	0	0	88%	0
verre technique	26.15	1 615	7 324	0	0	91%	0
<b>Slovaquie</b>							
verre plat	26.11	195	2 227	0	0	63%	0
verre creux	26.13	473	2 179	191	878	63%	553
fibres de verre	26.14	1 897	3 619	239	456	88%	400
verre technique	26.15	1 615	7 324	281	1 274	91%	1 163
<b>République tchèque</b>							
verre plat	26.11	195	2 227	0	0	63%	0
verre creux	26.13	473	2 179	235	1 081	63%	681
fibres de verre	26.14	1 897	3 619	0	0	88%	0
verre technique	26.15	1 615	7 324	388	1 758	91%	1 605
<b>TOTAL 4 PECO</b>							
verre plat	26.11	195	2 227	112	1 282	63%	810
verre creux	26.13	473	2 179	486	2 237	63%	1 409
fibres de verre	26.14	1 897	3 619	266	508	88%	446
verre technique	26.15	1 615	7 324	769	3 486	91%	3 183

**Tableau 10: Consommations énergétiques du reste des pays européens**

## Bibliographie

### [Beerkens, 2001]

Beerkens RGC., Van Limpt J., Energy Efficiency Benchmarking of glass furnaces, presented at the 62<sup>nd</sup> Conference on glass problems, 2004.

### [BREF, 2001]

BREF, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on Best Available Techniques in the Glass Manufacturing Industry, 2001.

### [Carvalho, 1997]

Carvalho M., Nogueira M., Improvement of Energy Efficiency In Glass-Melting Furnaces, Cement Kilns and Baking Ovens, 1997.

### [CEREN, 2006]

Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie, Le profil énergétique du secteur des matériaux de construction et du verre, Secteur E19 – E20 – E21 – E22, Enquête par enquête, EMIE 2004, 2006.

### [FIV, 2004]

Fédération de l'industrie du verre, La réduction des émissions de gaz à effet de serre, 2004.

### [FIV, 2005]

Fédération de l'industrie du verre, rapport annuel 2005.

### [GMIC, 1996]

Glass Manufacturing Industry Council, Glass: For a Bright Future a Clear Vision, 1996.

### [Jamison, 2002]

Jamison K., Eisenhower J., Rash J., Glass industry technology road map, Glass Manufacturing Industry Council and the Office of Industrial Technologies, 2002.

### [Jaume, 2004]

Jaume R., Hauser C., Meublat O., Fiche sectorielle fabrication de verre et d'articles en verre, note interne EDF, 2004.

### [M. Rue, 2007]

M. Rue D., Servaites J., Wolf W., Industrial Glass Bandwidth Analysis, Gas Technology institute, Energy Utilization Center, 2007

### [OIT, 2001]

Office of Industrial Technologies, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy, Glass Industry of the Future, Industrial Partnerships: Advancing Energy and Environmental Goals, 2001.

### [Ross, 2004]

Ross P., Tincher GL., Rasmussen M., Glass Melting Technology: A Technical and Economic Assessment, Glass Manufacturing Industry Council, 2004.

**[Technique de l'ingénieur]**

Mossé M., Emballages en verre

Phalippou J., Verres Propriétés et applications

**[UNIDO, 1993]**

United Nations Industrial Development Organization, GLASS INDUSTRY: Output of a Seminar on Energy Conservation in Glass Industry, 1993.

**[Worrell, 2007]**

*Worrell E., Galitsky C., Masanet E., Graus W.*, Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Glass Industry, Environmental Energy Technologies Division Sponsored by the U.S. Environmental Protection Agency , 2007.

---

## ***AVERTISSEMENT***

**Pour des raisons de confidentialité et de droit de reproduction de données technico-économiques, EDF R&D a souhaité masquer certaines données dans la présentation des secteurs industriels, en particulier les données CEREN, ULCOS et interne EDF.**

---

---

## ***ANNEXE V***

### ***LES AUTRES MATERIAUX DE CONSTRUCTION***

---

**TABLE DES MATIERES**

<b>1. DESCRIPTION GENERALE DES PROCEDES DE FABRICATION.....</b>	<b>391</b>
<b>2. LA CERAMIQUE.....</b>	<b>392</b>
2.1. DONNEES D'ENTREE PROCEDES DE FABRICATION .....	392
2.2. LE SYSTEME ENERGETIQUE DE REFERENCE (RES) .....	394
2.3. LES DONNEES STATISTIQUES UTILISEES COMME ENTREES DU MODELE.....	394
2.3.1. <i>Les nouvelles technologies</i> .....	394
2.3.2. <i>Les données de production</i> .....	395
2.3.3. <i>Les consommations énergétiques</i> .....	397
<b>3. LES TUILES.....</b>	<b>400</b>
3.1. DONNEES D'ENTREE PROCEDES DE FABRICATION .....	400
3.2. LE SYSTEME ENERGETIQUE DE REFERENCE (RES) .....	400
3.3. LES DONNEES STATISTIQUES UTILISEES COMME ENTREES DU MODELE.....	401
3.3.1. <i>Les nouvelles technologies</i> .....	401
3.3.2. <i>Les données de production</i> .....	401
3.3.3. <i>Les consommations énergétiques</i> .....	402
<b>4. LES BRIQUES .....</b>	<b>402</b>
4.1. DONNEES D'ENTREE PROCEDES DE FABRICATION .....	402
4.2. LE SYSTEME ENERGETIQUE DE REFERENCE (RES) .....	402
4.3. LES DONNEES STATISTIQUES UTILISEES COMME ENTREES DU MODELE.....	403
4.3.1. <i>Les nouvelles technologies</i> .....	403
4.3.2. <i>Les données de production</i> .....	403
4.3.3. <i>Les consommations énergétiques</i> .....	404
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>407</b>

**➤ TABLEAUX**

Tableau 1: Améliorations globales pour l'industrie de la céramique .....	394
Tableau 2: Production de l'industrie de la céramique en France en Mt .....	395
Tableau 3: Production de l'industrie de la céramique pour le reste de l'Europe en Mt.....	396
Tableau 4: Consommation en TWh par type de combustibles de l'industrie de la céramique .....	397
Tableau 5: Consommation d'électricité par usage en TWh .....	397
Tableau 6: Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières .....	398
Tableau 7: Consommations énergétiques du reste des pays européens.....	399
Tableau 8: Améliorations globales pour l'industrie des tuiles en France.....	401
Tableau 9: Production de l'industrie des tuiles en France en Mt .....	401
Tableau 10: Production de l'industrie de tuiles pour le reste de l'Europe en Mt .....	402
Tableau 11: Améliorations globales pour l'industrie des briques en France.....	403
Tableau 12: Production de l'industrie des briques en France en Mt .....	403
Tableau 13: Production de l'industrie des briques pour le reste de l'Europe en Mt.....	404
Tableau 14: Consommation en TWh par type de combustibles de l'industrie des briques et tuiles.....	404
Tableau 15: Consommation d'électricité par usage en TWh.....	405
Tableau 16: Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières .....	405
Tableau 17: Consommations énergétiques du reste des pays européens.....	406

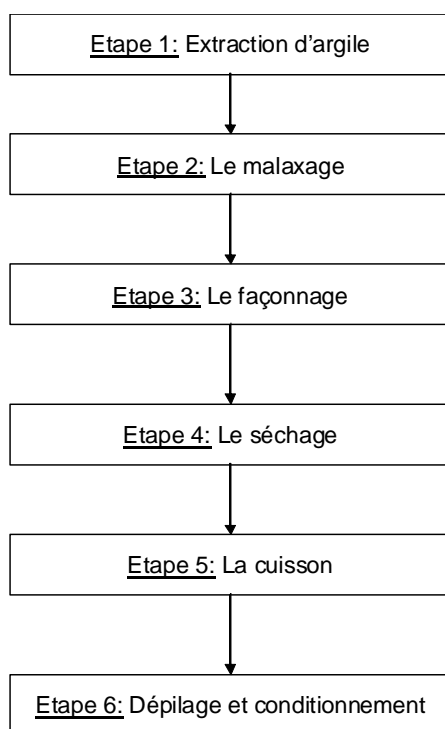
**➤ FIGURES**

Figure 1: principales étapes de la fabrication des autres matériaux de construction .....	391
Figure 2: Répartition des consommations énergétiques par opération (hors chaudière) .....	397
Figure 3: Répartition des consommations énergétiques par opération (hors chaudière) .....	405

## 1. Description générale des procédés de fabrication

Pour fabriquer les autres matériaux de construction tels que la céramique, les tuiles et les briques, cinq étapes sont nécessaires :

- l'extraction de la matière première (principalement de l'argile),
- le malaxage (préparation de la pâte),
- le façonnage (mise en forme),
- le séchage
- la cuisson des pièces dans le four.



**Figure 1: principales étapes de la fabrication des autres matériaux de construction**

Le produit de base utilisé est généralement de l'argile. Dans l'industrie de la céramique, des kaolins, des feldspaths et des sables sont également utilisés. Les établissements de production sont pour la plupart couplés à une carrière d'où est extraite l'argile.

Une fois extraite de la carrière, les argiles sont disposées en couches successives afin d'obtenir une composition régulière.

Le mélange obtenu est mis en stock après ultime vérification de sa composition, puis broyé dans des lamineurs finisseurs jusqu'à l'obtention de la granulométrie requise.

Ce mélange se réalise avec un taux d'humidité permettant d'atteindre la plasticité exigée pour le façonnage du produit. La teneur en humidité est contrôlée et il peut être nécessaire d'ajouter de l'eau pour obtenir la bonne plasticité. Des matériaux tels que la sciure de bois ou les résidus de l'industrie papetière peuvent être ajoutés pour augmenter la porosité du produit fini.

En ce qui concerne les briques, l'argile est extrudée ou moulée pour obtenir la forme requise puis coupée. Pour la fabrication des tuiles, ce processus peut présenter une deuxième étape

selon les types de tuiles. Dans cette phase la céramique se caractérise par le coulage, dont les matières premières sont mélangées avec de l'eau pour obtenir de la barbotine<sup>1</sup> qui sera versée dans des moules en plâtre.

Ensuite, la phase de séchage s'effectue selon des cycles de durée variables en fonction des produits fabriqués et des types d'installation. Cette étape vise à évacuer progressivement l'eau de façonnage, une phase essentielle à la qualité future des produits.

La phase de cuisson : les produits sont chargés dans des fours via des wagonnets pour être cuits. Selon les compositions, les températures de cuisson peuvent être variées entre 950 et 1900° pour la céramique, 850 et 1200° pour les briques et les tuiles.

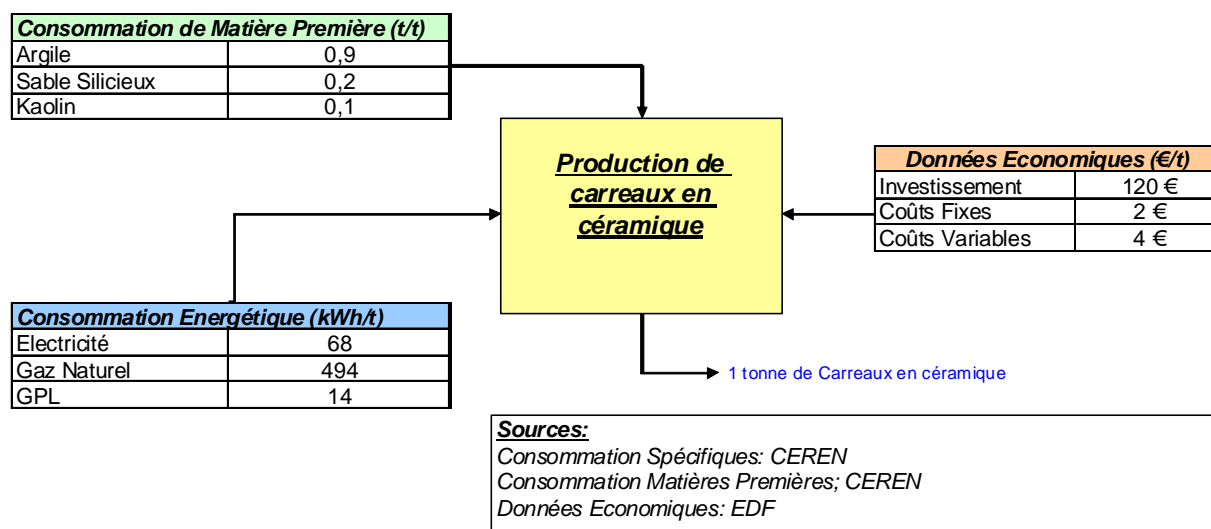
En règle générale, les manufactures sont équipées de fours continus de type four tunnel. Pour les produits spéciaux de la céramique sont cuits pour la plupart dans des fours individuels, à cloche ou à chambres.

En dernier, les produits sortis du four après refroidissement, sont orientés vers les postes de dépilage et de conditionnement. Pour la céramique, les produits sont triés et en partie retouchés.

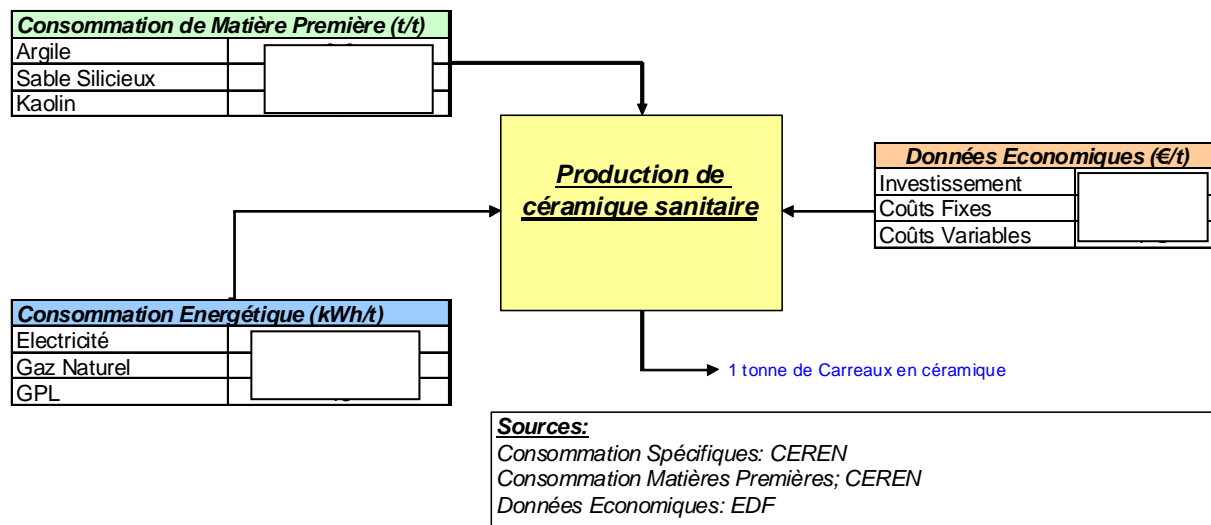
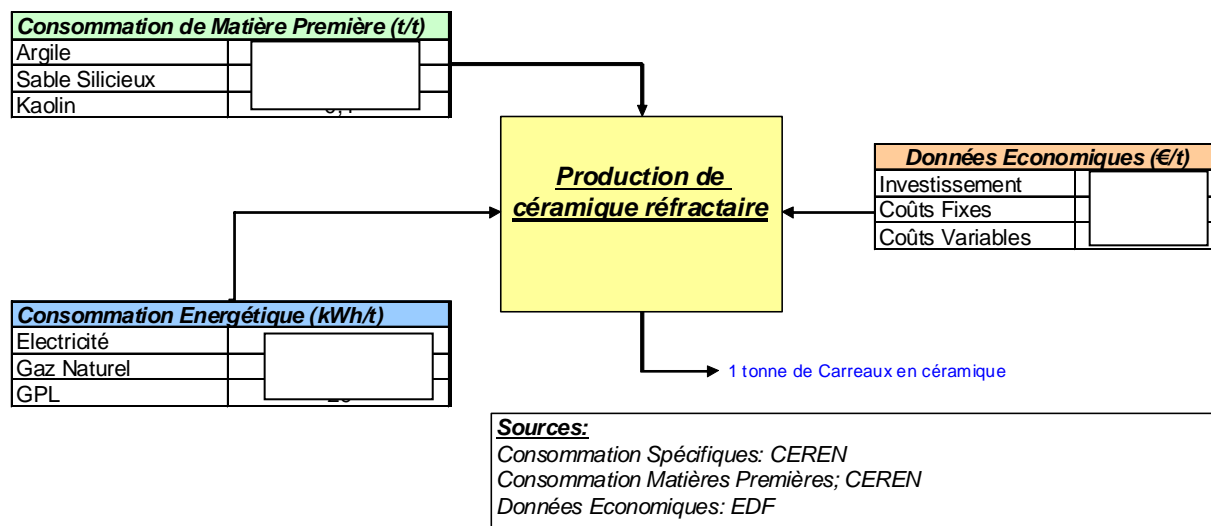
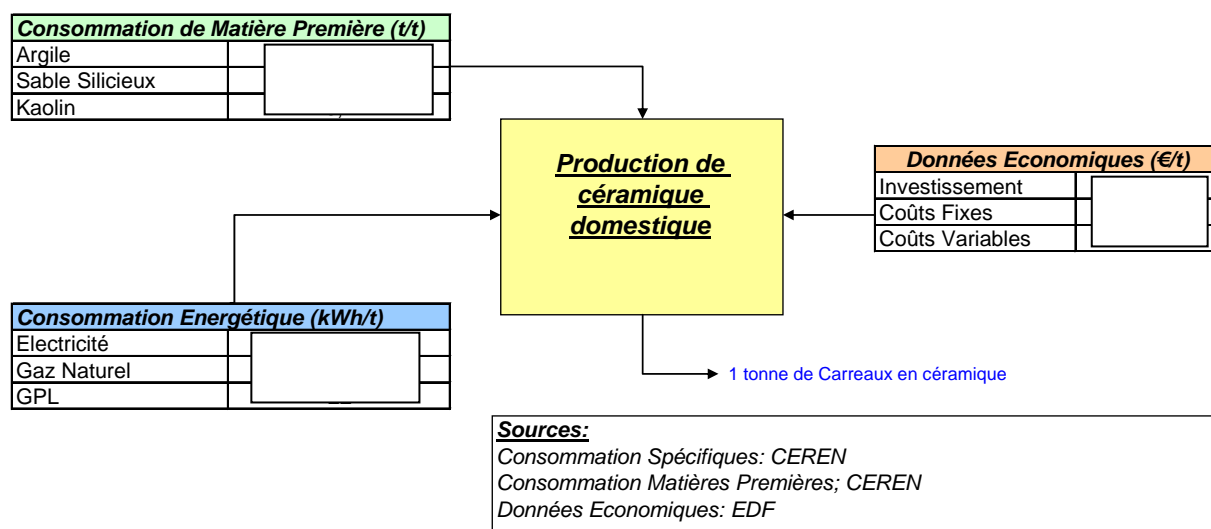
## 2. La céramique

### 2.1. Données d'entrée procédés de fabrication

#### ➤ Carreaux en céramique



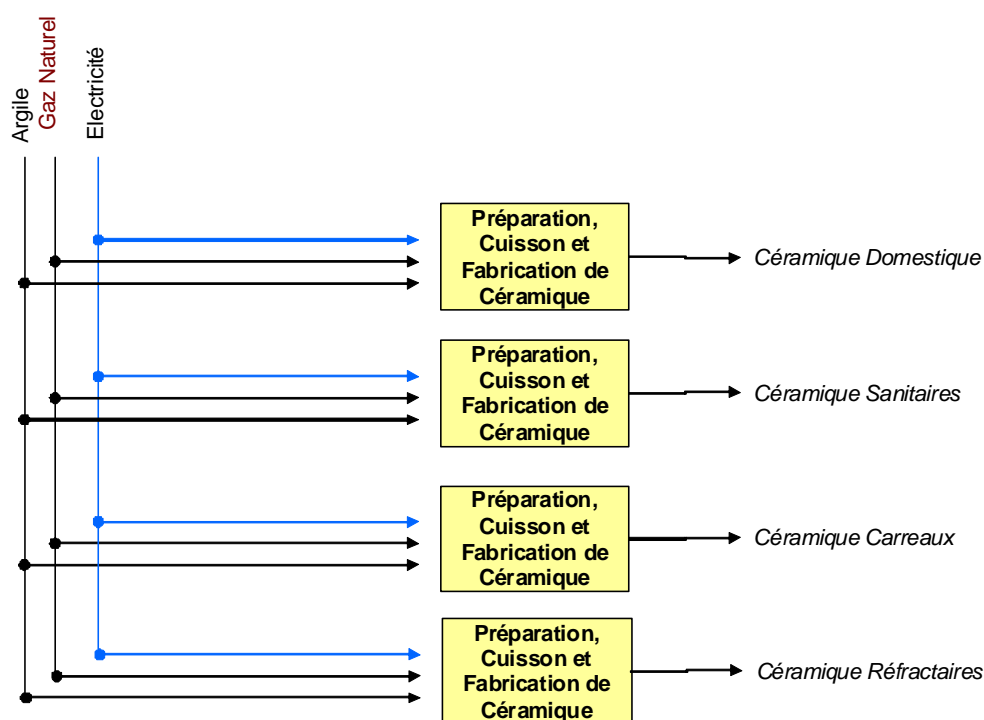
<sup>1</sup> Suspension fluide

➤ **Céramique sanitaire**➤ **Céramique réfractaire**➤ **Céramique domestique**



## 2.2. Le Système Energétique de Référence (RES)

Dans un cadre global, notre étude se base sur le système énergétique de référence (RES) ci-dessous. Le système énergétique de référence est adapté de manière à donner une représentation claire cohérente avec une interaction de plusieurs paramètres techniques et économiques. La conception du RES a été fixée par l'intérêt accordé à chaque atelier en termes de consommation énergétique et les émissions de CO<sub>2</sub>.



## 2.3. Les données statistiques utilisées comme entrées du modèle

### 2.3.1. Les nouvelles technologies

#### Améliorations globales pour l'industrie de la céramique

Pour l'industrie de la céramique en France, les experts sectoriels d'EDF ont estimé certaines améliorations par tranche de temps. Les améliorations ont été estimées par rapport au procédé de base (de référence). En Europe, les mêmes améliorations ont été reconduites.

Céramique				
Année	2020	2030	2040	2050
CS <sup>2</sup> électricité (kWh/t)				
CS Combustibles (kWh/t)				

Source : [Escarnot, 2006]

**Tableau 1: Améliorations globales pour l'industrie de la céramique**

<sup>2</sup> Consommation spécifique

### 2.3.2. Les données de production

#### Les données de production cas de la France

Les données répertoriées ci-dessous concernent le secteur de la céramique 262(A-C-E-G-J-L) 263Z. Les données de production proviennent du SESSI, CEREN et de l'INSEE ou des enquêtes au près des organismes professionnels.

Produit	Production (Mt)
Carreaux en céramique	
Céramique Sanitaire	
Céramique Réfractaire	
Céramique Domestique	

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 2: Production de l'industrie de la céramique en France en Mt**

#### Les données de production cas du reste de l'Europe<sup>3</sup>

Pays	Produits	Production Million de tonnes (Mt)
Autriche	Céramique sanitaires	0,007
	Céramique réfractaires	0,485
Belgique	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,079
Suisse	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
Chypre	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
République Tchèque	Céramique sanitaires	0,037
	Céramique réfractaires	0,996
Allemagne	Céramique sanitaires	0,114
	Céramique réfractaires	1,611
Danemark	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
Estonie	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
Espagne	Céramique sanitaires	0,101
	Céramique réfractaires	0,610
Finlande	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
Grèce	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
Hongrie	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
Irlande	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
Islande	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
Italie	Céramique sanitaires	0,147
	Céramique réfractaires	0,558
Lituanie	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
Luxembourg	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
Lettonie	Céramique sanitaires	0,000

<sup>3</sup> La valeur 0 est la valeur intégrée dans le modèle, elle exprime le manque de la donnée.

	Céramique réfractaires	0,000
Malte	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
Pays-Bas	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,085
Norvège	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
Pologne	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
Portugal	Céramique sanitaires	0,059
	Céramique réfractaires	0,023
Romanie	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
Suède	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
Slovénie	Céramique sanitaires	0,000
	Céramique réfractaires	0,000
Slovaquie	Céramique sanitaires	0,364
	Céramique réfractaires	0,553
Royaume-Uni	Céramique sanitaires	0,304
	Céramique réfractaires	0,692
<b>Pays</b>	<b>Produits</b>	<b>Production Million de m<sup>2</sup> (Mm<sup>2</sup>)</b>
Autriche	Carreaux en céramique	3,000
Belgique	Carreaux en céramique	0,678
Suisse	Carreaux en céramique	0,000
Chypre	Carreaux en céramique	0,000
République Tchèque	Carreaux en céramique	31,000
Allemagne	Carreaux en céramique	58,000
Danemark	Carreaux en céramique	0,000
Estonie	Carreaux en céramique	0,000
Espagne	Carreaux en céramique	588,593
Finlande	Carreaux en céramique	0,000
Grèce	Carreaux en céramique	0,000
Hongrie	Carreaux en céramique	9,284
Irlande	Carreaux en céramique	0,000
Islande	Carreaux en céramique	0,000
Italie	Carreaux en céramique	655,527
Lituanie	Carreaux en céramique	0,000
Luxembourg	Carreaux en céramique	0,000
Lettonie	Carreaux en céramique	0,000
Malte	Carreaux en céramique	0,000
Pays-Bas	Carreaux en céramique	0,000
Norvège	Carreaux en céramique	0,000
Pologne	Carreaux en céramique	0,000
Portugal	Carreaux en céramique	48,861
Romanie	Carreaux en céramique	0,000
Suède	Carreaux en céramique	0,000
Slovénie	Carreaux en céramique	0,000
Slovaquie	Carreaux en céramique	8,274
Royaume-Uni	Carreaux en céramique	33,233

**Tableau 3: Production de l'industrie de la céramique pour le reste de l'Europe en Mt**

### 2.3.3. Les consommations énergétiques

#### 2.3.3.1. Consommation de combustibles par usage final le cas de la France

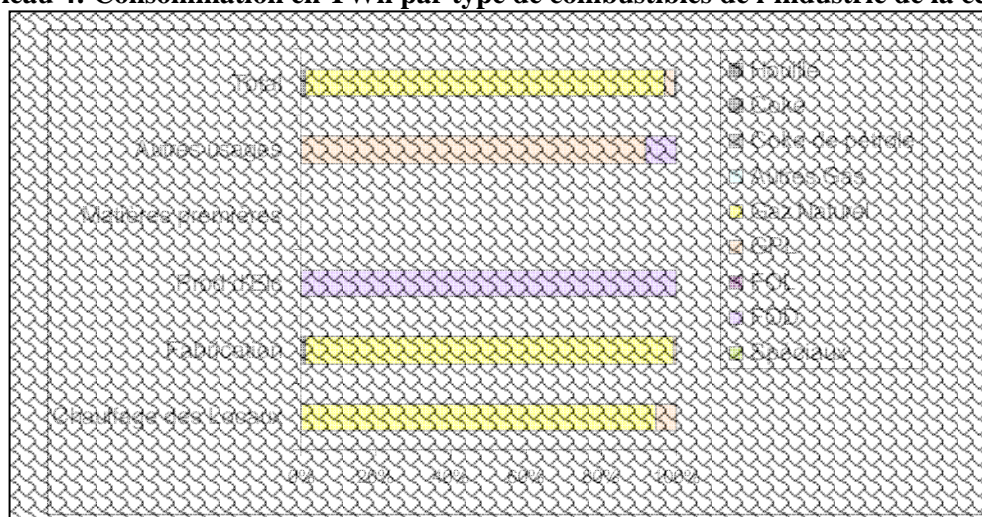
La consommation de combustibles du secteur de la céramique s'élève à 2,62 TWh. Elle représente 1,6% de l'ensemble des IGCE.

Les principales formes d'énergie utilisées sont variées : prédominance du gaz naturel (96%), GPL (2%), Houille (1%) et GPL (1%).

Segment	Opérations	Combustibles								
		Houille	Coke	Autres Gaz	Gaz Naturel	GPL	FOL	FOD	Spéciaux	Total
Céramique	Hors chaudières									
	Sous chaudières									
	Total									

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 4: Consommation en TWh par type de combustibles de l'industrie de la céramique**



Réalisé à partir des données CEREN

**Figure 2: Répartition des consommations énergétiques par opération (hors chaudière)**

La consommation d'électricité représente 0,37 TWh dont 76% est utilisé pour l'énergie mécanique.

Segment	Usage								
	Eclairage	Energie mécanique	dont Air Comprimé	Electrolyse aqueuse	usage thermique	dont Chauffage des locaux	dont Production froid	Autres usage	Total
Céramique									

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 5: Consommation d'électricité par usage en TWh**

#### Consommation énergétique des chaudières

Dans les consommations énergétiques sous chaudière, il apparaît que le gaz naturel, représentent la grande part des énergies consommées (92% du total des consommations sous chaudières et hors récupération).

Segment	Type	Nombre	Combustible	Consommation	Capacité	Disponibilité	Rendement	Age (ans)
Céramique	de chauffage central							
	à tubes de fumée							
	de chauffage central							
	de chauffage central							
	à tubes de fumée							
	autres							
Total								

Source : CEREN

**Tableau 6: Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières**

**2.3.3.2. Consommation de combustibles par usage final le cas de l'Europe**

Céramique						
	CSe <sup>4</sup>	CSc <sup>5</sup>	Électricité	Combustibles	gaz	gaz
	(kWh/t)	(kWh/t)	(GWh)	(GWh)	%	(GWh)
<b>Allemagne</b>						
Sanitaires	730	5 323	83	607	67%	405
Réfractaires	789	1 232	1 271	1 985	62%	1 222
Carreaux en céramique (kWh/m2)	4	28	240	1 624	93%	1 517
<b>Belgique</b>						
Sanitaires	730	5 323	0	0	98%	0
Réfractaires	789	1 232	62	97	90%	87
Carreaux en céramique (kWh/m2)	4	28	3	19	97%	18
<b>Pays-Bas</b>						
Sanitaires	730	5 323	0	7	98%	7
Réfractaires	789	1 232	67	105	90%	94
Carreaux en céramique (kWh/m2)	4	28	0	518	97%	504
<b>Espagne</b>						
Sanitaires	730	5 323	74	538	90%	484
Réfractaires	789	1 232	481	752	90%	676
Carreaux en céramique (kWh/m2)	4	28	2 431	16 481	90%	14 833
<b>Italie</b>						
Sanitaires	730	5 323	107	780	98%	764
Réfractaires	789	1 232	440	687	90%	618
Carreaux en céramique (kWh/m2)	4	28	2 707	18 355	97%	17 847
<b>Royaume-Uni</b>						
Sanitaires	730	5 323	222	1 618	66%	1 071
Réfractaires	789	1 232	546	853	50%	430
Carreaux en céramique (kWh/m2)	4	28	137	931	51%	477
<b>Portugal</b>						

<sup>4</sup> CSe : Consommation Spécifique électricité

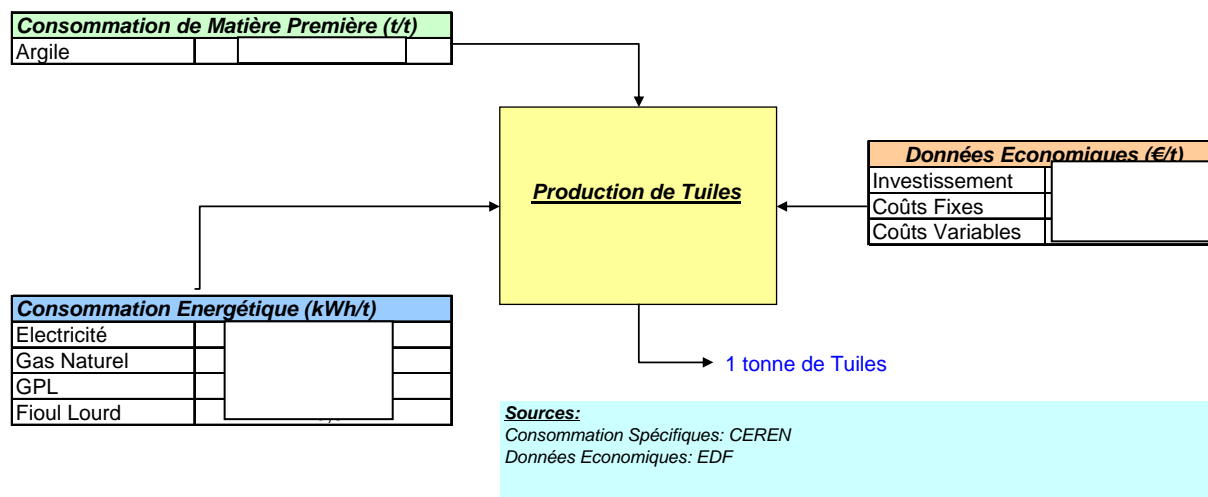
<sup>5</sup> CSc : Consommation Spécifique combustibles

Sanitaires	730	5 323	43	316	98%	310
Réfractaires	789	1 232	18	28	90%	26
Carreaux en céramique (kWh/m2)	4	28	202	1 368	1%	8
<b>Autriche</b>						
Sanitaires	730	5 323	5	37	98%	37
Réfractaires	789	1 232	383	598	90%	537
Carreaux en céramique (kWh/m2)	4	28	12	84	97%	82
<b>TOTAL 9 PAYS UE</b>						
Sanitaires	730	5 323	606	4 425	81%	3 588
Réfractaires	789	1 232	3 559	5 558	74%	4 097
Carreaux en céramique (kWh/m2)	4	28	5 900	40 518	90%	36 392
<b>Hongrie</b>						
Sanitaires	730	5 323	0	0	98%	0
Réfractaires	789	1 232	0	0	90%	0
Carreaux en céramique (kWh/m2)	4	28	38	260	97%	253
<b>Pologne</b>						
Sanitaires	730	5 323	0	0	98%	0
Réfractaires	789	1 232	0	0	90%	0
Carreaux en céramique (kWh/m2)	4	28	0	0	97%	0
<b>Slovaquie</b>						
Sanitaires	730	5 323	266	1 938	98%	1 898
Réfractaires	789	1 232	436	681	90%	612
Carreaux en céramique (kWh/m2)	4	28	34	232	97%	225
<b>République tchèque</b>						
Sanitaires	730	5 323	27	197	98%	193
Réfractaires	789	1 232	786	1 227	90%	1 103
Carreaux en céramique (kWh/m2)	4	28	128	868	97%	844
<b>TOTAL 4 PECO</b>						
Sanitaires	730	5 323	293	2 135	98%	2 091
Réfractaires	789	1 232	1 222	1 908	90%	1 715
Carreaux en céramique (kWh/m2)	4	28	201	1 360	97%	1 322

**Tableau 7: Consommations énergétiques du reste des pays européens**

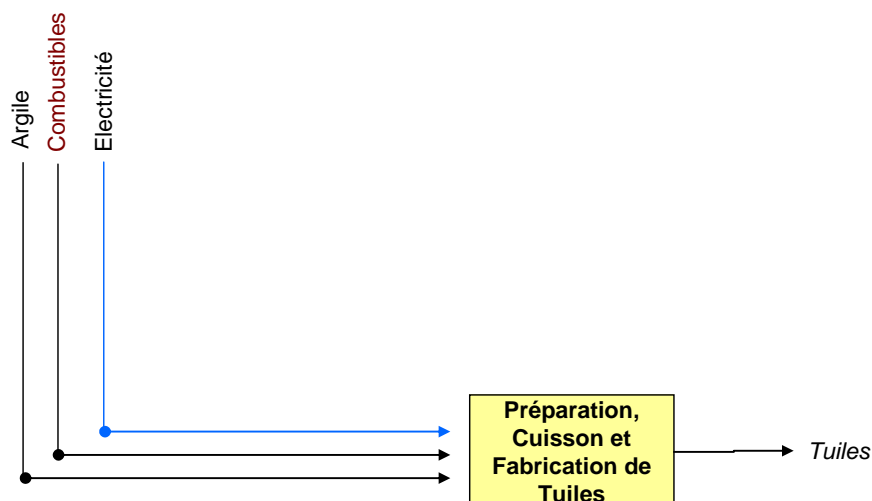
### 3. Les Tuiles

#### 3.1. Données d'entrée procédés de fabrication



#### 3.2. Le Système Energétique de Référence (RES)

Dans un cadre global, notre étude se base sur le système énergétique de référence (RES) ci-dessous. Le système énergétique de référence est adapté de manière à donner une représentation claire cohérente avec une interaction de plusieurs paramètres techniques et économiques. La conception du RES a été fixée par l'intérêt accordé à chaque atelier en termes de consommation énergétique et les émissions de CO<sub>2</sub>.



### 3.3. Les données statistiques utilisées comme entrées du modèle

#### 3.3.1. Les nouvelles technologies

##### Améliorations globales pour l'industrie des tuiles le cas de la France

Pour l'industrie des tuiles en France, les experts sectoriels d'EDF ont estimé certaines améliorations par tranche de temps. Les améliorations ont été estimées par rapport au procédé de base (de référence).

Tuiles				
Année	2020	2030	2040	2050
CS <sup>6</sup> électricité (kWh/t)				
CS Combustibles (kWh/t)				

Source : [Escarnot, 2006]

**Tableau 8: Améliorations globales pour l'industrie des tuiles en France**

#### 3.3.2. Les données de production

##### Les données de production cas de la France

Les données répertoriées ci-dessous concernent le secteur des tuiles (265A). Les données de production proviennent du SESSI, CEREN et de l'INSEE ou des enquêtes au près des organismes professionnels.

Produit	Production (Mt)
Tuiles	

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 9: Production de l'industrie des tuiles en France en Mt**

##### Les données de production cas du reste de l'Europe

Pays	Produits	Production Million de m <sup>2</sup> (Mm <sup>2</sup> )
Autriche	tuiles	8,000
Belgique	tuiles	0,000
Suisse	tuiles	0,000
Chypre	tuiles	0,000
République Tchèque	tuiles	0,233
Allemagne	tuiles	36,564
Danemark	tuiles	0,000
Estonie	tuiles	0,000
Espagne	tuiles	38,758
Finlande	tuiles	0,000
Grèce	tuiles	0,000
Hongrie	tuiles	1,884
Irlande	tuiles	0,000
Islande	tuiles	0,000

<sup>6</sup> Consommation spécifique



Italie	tuiles	40,579
Lituanie	tuiles	0,000
Luxembourg	tuiles	0,000
Lettonie	tuiles	0,000
Malte	tuiles	0,000
Pays-Bas	tuiles	4,000
Norvège	tuiles	0,000
Pologne	tuiles	0,000
Portugal	tuiles	23,783
Romanie	tuiles	0,000
Suède	tuiles	0,000
Slovénie	tuiles	0,000
Slovaquie	tuiles	0,000
Royaume-Uni	tuiles	77,373

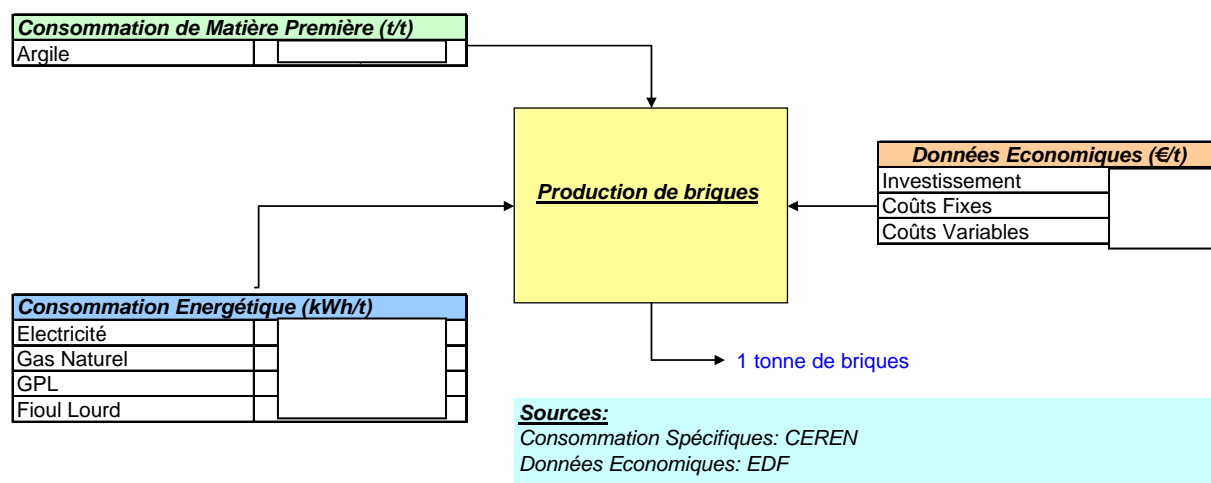
**Tableau 10: Production de l'industrie de tuiles pour le reste de l'Europe en Mt**

### 3.3.3. Les consommations énergétiques

Les données concernant les consommations énergétiques de l'industrie des tuiles, sont représentées conjointement avec l'industrie des briques voir section (4.3.3).

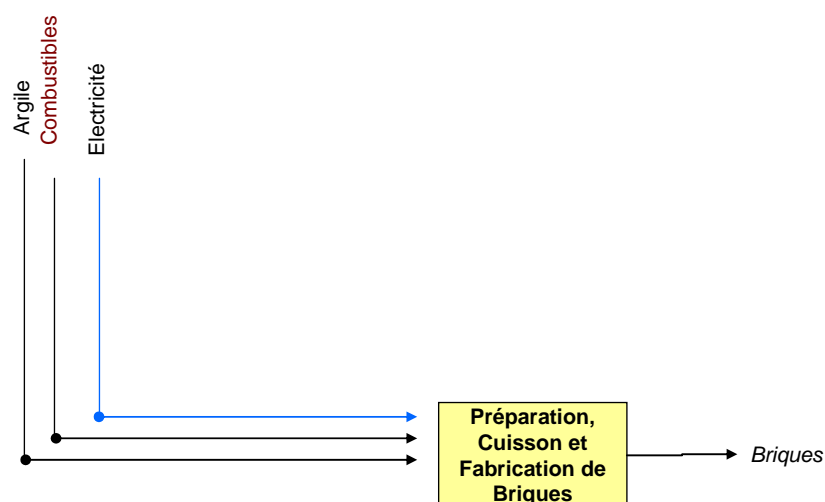
## 4. Les Briques

### 4.1. Données d'entrée procédés de fabrication



### 4.2. Le Système Energétique de Référence (RES)

Dans un cadre global, notre étude se base sur le système énergétique de référence (RES) ci-dessous. Le système énergétique de référence est adapté de manière à donner une représentation claire cohérente avec une interaction de plusieurs paramètres techniques et économiques. La conception du RES a été fixée par l'intérêt accordé à chaque atelier en termes de consommation énergétique et les émissions de CO<sub>2</sub>.



## 4.3. Les données statistiques utilisées comme entrées du modèle

### 4.3.1. Les nouvelles technologies

#### Améliorations globales pour l'industrie des briques le cas de la France

Pour l'industrie des briques en France, les experts sectoriels d'EDF ont estimé certaines améliorations par tranche de temps. Les améliorations ont été estimées par rapport au procédé de base (de référence).

Briques				
Année	2020	2030	2040	2050
CS <sup>7</sup> électricité (kWh/t)				
CS Combustibles (kWh/t)				

Source : [Escarnot, 2006]

**Tableau 11: Améliorations globales pour l'industrie des briques en France**

### 4.3.2. Les données de production

#### Les données de production cas de la France

Les données répertoriées ci-dessous concernent le secteur des briques. Les données de production proviennent du SESSI, CEREN et de l'INSEE ou des enquêtes au près des organismes professionnels.

Produit	Production (Mt)
Briques	

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 12: Production de l'industrie des briques en France en Mt**

#### Les données de production cas du reste de l'Europe

<sup>7</sup> Consommation spécifique

Pays	Produits	Production Million de m <sup>3</sup> (Mm <sup>3</sup> )
Autriche	briques	0,44
Belgique	briques	2,640
Suisse	briques	0,000
Chypre	briques	0,000
République Tchèque	briques	2,505
Allemagne	briques	9,824
Danemark	briques	0,000
Estonie	briques	0,000
Espagne	briques	24,368
Finlande	briques	0,000
Grèce	briques	0,000
Hongrie	briques	2,801
Irlande	briques	0,000
Islande	briques	0,000
Italie	briques	14,837
Lituanie	briques	0,000
Luxembourg	briques	0,000
Lettonie	briques	0,000
Malte	briques	0,000
Pays-Bas	briques	1,615
Norvège	briques	0,000
Pologne	briques	0,000
Portugal	briques	1,183
Romanie	briques	0,000
Suède	briques	0,000
Slovénie	briques	0,000
Slovaquie	briques	2,058
Royaume-Uni	briques	3,850

**Tableau 13: Production de l'industrie des briques pour le reste de l'Europe en Mt**

### 4.3.3. Les consommations énergétiques

#### 4.3.3.1. Consommation de combustibles par usage final le cas de la France

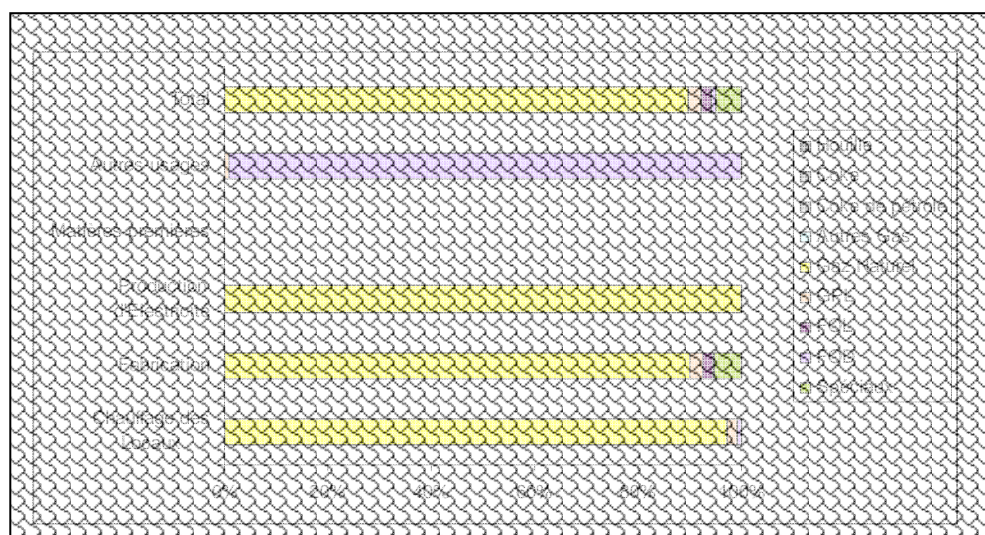
La consommation de combustibles du secteur des briques et des tuiles (264 A-B-C) s'élève à 3,770 TWh, Elle représente 2,3% de l'ensemble des IGCE,

Les principales formes d'énergie utilisées sont variées : prédominance du gaz naturel.

Segment	Opérations	Combustibles					
		Gaz Naturel	GPL	FOL	FOD	Spéciaux	Total
Tuiles & Briques	Hors chaudières						
	Sous chaudières						
	Total						

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 14: Consommation en TWh par type de combustibles de l'industrie des briques et tuiles**



Réalisé à partir des données CEREN

**Figure 3: Répartition des consommations énergétiques par opération (hors chaudière)**

La consommation d'électricité représente 0,45 TWh dont 93% est utilisé pour l'énergie mécanique,

Segment	Usage								
	Eclairage	Energie mécanique	dont Air Comprimé	Electrolyse aqueuse	usage thermique	dont Chauffage des locaux	dont Production froid	Autres usage	Total
Tuiles & Briques									

Source : [CEREN, 2006]

**Tableau 15: Consommation d'électricité par usage en TWh**

### Consommation énergétique des chaudières

Dans les consommations énergétiques sous chaudière, il apparaît que le gaz naturel, représentent la grande part des énergies consommées (97% du total des consommations sous chaudières et hors récupération).

Segment	Type	Nombre	Combustible	Consommation	Capacité	Disponibilité	Rendement	Age (ans)
Tuiles & Briques	de chauffage central							
	à tubes de fumée							
	autres							
	à tubes de fumée							
	à tubes de fumée							
Total	de chauffage central							

Source : CEREN

**Tableau 16: Consommation en GWh et puissance installée en MW des chaudières**

### 4.3.3.2. Consommation de combustibles par usage final le cas de l'Europe

Tuiles et briques							
	Unité	CSe	CSc	Électricité	Combustibles	Gaz Naturel	Gaz Naturel
		(kWh/u)	(kWh/u)	(GWh)	(GWh)	%	(GWh)
Allemagne							
Briques	m <sup>3</sup>	52	385	512	3,779	123%	4,633
Tuiles	m <sup>2</sup>	4	38	161	1,406	123%	1,724
Belgique							
Briques	m <sup>3</sup>	52	385	138	1,016	85%	859
Tuiles	m <sup>2</sup>	4	38	0	0	92%	0
Pays-Bas							
Briques	m <sup>3</sup>	52	385	84	621	85%	526
Tuiles	m <sup>2</sup>	4	38	18	154	92%	142
Espagne							
Briques	m <sup>3</sup>	52	385	1,270	9,374	80%	7,499
Tuiles	m <sup>2</sup>	4	38	171	1,491	85%	1,267
Italie							
Briques	m <sup>3</sup>	52	385	774	5,708	85%	4,829
Tuiles	m <sup>2</sup>	4	38	179	1,561	92%	1,442
Royaume-Uni							
Briques	m <sup>3</sup>	52	385	201	1,481	55%	813
Tuiles	m <sup>2</sup>	4	38	341	2,976	55%	1,633
Portugal							
Briques	m <sup>3</sup>	52	385	62	455	85%	388
Tuiles	m <sup>2</sup>	4	38	105	915	92%	845
Autriche							
Briques	m <sup>3</sup>	52	385	23	169	85%	143
Tuiles	m <sup>2</sup>	4	38	35	308	92%	284
TOTAL 9 PAYS UE							
Briques	m <sup>3</sup>	52	385	3,220	23,760	87%	20,669
Tuiles	m <sup>2</sup>	4	38	1,277	11,134	85%	9,485
Hongrie							
Briques	m <sup>3</sup>	52	385	146	1,078	85%	912
Tuiles	m <sup>2</sup>	4	38	8	72	92%	67
Pologne							
Briques	m <sup>3</sup>	52	385	0	0	85%	0
Tuiles	m <sup>2</sup>	4	38	0	0	92%	0
Slovaquie							
Briques	m <sup>3</sup>	52	385	107	792	85%	670
Tuiles	m <sup>2</sup>	4	38	0	0	92%	0
République tchèque							
Briques	m <sup>3</sup>	52	385	131	964	85%	815
Tuiles	m <sup>2</sup>	4	38	1	9	92%	8
TOTAL 4 PECO							
Briques	m <sup>3</sup>	52	385	384	2,833	85%	2,397
Tuiles	m <sup>2</sup>	4	38	9	81	92%	75

Tableau 17: Consommations énergétiques du reste des pays européens

## Bibliographie

### [BREF, 2007]

Prévention et réduction intégrées de la pollution, Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour la fabrication de produits céramiques, 2007.

### [CEREN, 2000]

CEREN, Le profil énergétique du secteur des matériaux de construction et du verre, enquête par enquêteurs EMIE, 2000.

### [CEREN, 2003]

Modèle de consommations d'énergie dans l'industrie en Europe, Etude Réalisée pour EDF, CEREN 2003.

### [CEREN, 2006]

Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie, Le profil énergétique du secteur des matériaux de construction et du verre, Secteur E19 – E20 – E21 – E22, Enquête par enquête, EMIE 2004, 2006.

### [Ferreira]

Ferreira J.M.F., et al., Waste Recycling in the Ceramic Industry, Recycling of granite sludges in brick type and floor tiletype ceramic formulation, Euroceram news n°14.

### [Ribeiro]

Ribeiro1 M.J., Ferreira J.M., Labrincha J.A., Waste Recycling in the Ceramic Industry, Incorporation of clay based ceramic formulation containing different solid wastes

### [UNIDO, 1994]

Output of a Seminar on Energy Conservation in Ceramic Industry, United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), Ministry of International Trade and Industry (MITI), Japan, 1994.

Energy efficiency in ceramics processing, Practical worksheets for industry, Energy worksheets 1 – 8.  
[www.tangram.co.uk/TI-Energy%20Worksheets%20\(Ceramics\)%20-%20Tangram.pdf](http://www.tangram.co.uk/TI-Energy%20Worksheets%20(Ceramics)%20-%20Tangram.pdf)

Energy Saving Method of Manufacturing Ceramic Products From Waste Glass, 2001.  
<http://www.nrel.gov/docs/fy01osti/28261.pdf>

Fiber-lined Kiln in Ceramics Industry.  
<http://www.serd.ait.ac.th/smi2/smi/roadmap/TFS/040.pdf>

A sustainability strategy for the U.K brick industry, Brick Development Association (U.K.), British Ceramic Confederation, Sustainability Working Party BDA/BCC.  
[www.staywithclay.com/downloads/SustainableBuildingConference-UK1.pdf](http://www.staywithclay.com/downloads/SustainableBuildingConference-UK1.pdf)

Fabrication de la brique  
[www.baksteen.be/UserFiles/Image/downloads/publicaties/fabrication%20brique.pdf](http://www.baksteen.be/UserFiles/Image/downloads/publicaties/fabrication%20brique.pdf)

<http://www.staywithclay.com>

<http://www.fftb.org>







## **Modélisation Bottom-Up, un outil d'aide à la décision long terme pour les mesures politiques en matière d'énergie et d'environnement – Le modèle TIMES appliqué aux industries grandes consommatrices d'énergie (IGCE).**

Parmi les consommateurs d'énergie en France et en Europe, certains secteurs industriels sont très importants et devraient avoir un rôle clé lors de l'évaluation du profil de la demande finale d'énergie dans l'avenir.

Notre travail de thèse consiste à construire un modèle pour une prospective énergétique à long terme dans le but d'estimer l'effet des politiques énergétiques et environnementales sur les choix technologiques futures des secteurs industriels. L'accent a été mis sur les industries grandes consommatrices d'énergie (IGCE).

L'outil de modélisation appliquée dans cette étude est le modèle TIMES (famille du modèle MARKAL). Il s'agit d'un générateur de modèle d'optimisation de type Bottom-up basé sur la programmation linéaire applicable à :

- un panel régional large et flexible (local, national ou international),
- un seul ou plusieurs systèmes énergétiques de référence,
- une seule ou plusieurs périodes et sous périodes (jour, nuit, pic, semaine, saison et année).

Le modèle TIMES permet de construire une base technologique riche pour l'estimation à long terme de la dynamique du système énergétique de référence. Le choix du modèle s'explique par sa renommée internationale, sa performance et sa flexibilité. Plusieurs laboratoires de recherche l'utilisent. Divers projets européens (NEEDS) ou mondiaux (SAGE) ont été développés autour.

L'étude est réalisée dans le cadre d'un partenariat entre EDF R&D et le Centre de Mathématiques appliquées (CMA) de l'Ecole des Mines de Paris. L'ensemble des industries prises en compte sont des IGCE : le papier, la sidérurgie, le ciment, la chaux, le verre, la céramique, les tuiles et les briques. Le champ d'étude concerne l'Europe des 27, la Norvège et la Suisse, pour un horizon de temps allant jusqu'à 2050.

Dans notre analyse, nous avons identifié pour chaque secteur industriel, plusieurs technologies concurrentes. Elles sont choisies par le modèle sous la base de leur coût global actualisé en intégrant l'ensemble des contraintes (prix d'énergie, taxe sur le CO<sub>2</sub>, plafond sur les émissions...). La capacité à installer dépend étroitement de la demande finale qu'il faut satisfaire pour chaque période sur l'ensemble de l'horizon de temps considéré. Selon les contraintes imposées, les résultats obtenus permettent de :

- tracer l'image de l'industrie (profil de production technologique),
- calculer les consommations énergétiques et les potentiels d'économies d'énergies réalisables,
- estimer les émissions de dioxyde de carbone résultantes

Ce travail indique qu'il existe encore un important potentiel d'économies d'énergie et de réductions des émissions de dioxyde de carbone dans l'ensemble des secteurs industriels.

**Mots clés :** Energie, Industrie, Technologie, Model bottom-up (TIMES), Efficacité Energétique, GES.

---

## **Bottom-Up modeling, a tool for decision support for long-term policy on energy and environment - The TIMES model applied to the energy intensive industries.**

Among the energy users in France and Europe, some industrial sectors are very important and should have a key role when assessing the final energy demand patterns in the future.

The aim of our work is to apply a prospective model for the long range analysis of energy/technology choices in the industrial sector, focussing on the energy-intensive sectors.

The modelling tool applied in this study is the TIMES model (family of best known MARKAL model). It is an economic linear programming model generator for local, national or multi regional energy systems, which provides a technology-rich basis for estimating energy dynamics over a long term, multi period time.

We illustrate our work with nine energy-intensive industrial sectors: paper, steel, glass, cement, lime, tiles, brick, ceramics and plaster. It includes a detailed description of the processes involved in the production of industrial products, providing typical energy uses in each process step.

In our analysis, we identified for each industry, several commercially available state-of-the-art technologies, characterized and chosen by the Model on the basis of cost effectiveness. Furthermore, we calculated potential energy savings, carbon dioxide emissions' reduction and we estimated the energy impact of a technological rupture. This work indicates that there still exists a significant potential for energy savings and carbon dioxide emissions' reduction in all industries.

**Keywords :** Energy, Industry, Technology, Bottom-up model (TIMES), Energy Efficiency, GHG.

---